INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



ORDENADORES EN MUSICA

Junio 1988
450 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

INVESTIGACION Y
CIENCIA

Apuntes

Unos 400.000 libros y revistas, entre los que se contaban ejemplares raros y únicos, han ardido en un incendio de la Biblioteca de la Academia Soviética de Ciencias en Leningrado. Se ha perdido en el siniestro parte del famoso fondo Baer, legado por el embriólogo Karl Ernst Baer a la academia. El sistema de alarma contra incendios llevaba cuatro años sin funcionar.

El fuego que se desató en la central nuclear de Windscale, el 10 de octubre de 1957, pudo muy bien haber incendiado el reactor y alcanzar por ende unas proporciones dramáticas, comparables a las del accidente de Chernobyl. Pero el informe oficial que podría haber puesto en peligro la imagen de la joven industria nuclear inglesa fue censurado por el Primer Ministro Harold Macmillan, según se ha sabido una vez levantado el secreto oficial que rodeaba al asunto.

Las siete vidas que la fantasía popular atribuye al gato tienen su fundamento científico. En un estudio reciente con una muestra de 132 individuos que habían caído de una altura de 2 a 32 pisos en la ciudad de Nueva York, se observó la supervivencia del 90 por ciento; lo llamativo del caso es que la curva de mortandad asciende con la altura de la caída hasta llegar al séptimo piso, para descender en adelante. Para explicar esa habilidad gatuna se aduce la labor de la selección natural, que ha producido que la mayoría de los felinos sean arbóreos y hayan alcanzado un refinado sistema vestibular tras millones de años de bascularse en las ramas y saltar de los árboles.

La National Audit Office, ente gubernamental británico encargado de valorar el rendimiento alcanzado por el programa Alvey, dedicado a fomentar la tecnología informática y la colaboración entre universidad e industria, acaba de hacer pública su frustración ante los pobres resultados obtenidos. En particular denuncia que, cuatro años después de su puesta en marcha, el subprograma concerniente a la ingeniería de soporte lógico no haya creado todavía ningún producto comercializable.

En 1778, Leonhard Euler propuso que la ecuación $x^4 + y^4 + z^4 = t^4$ no tenía solución entera positiva para x, y, z y t. Noam Elkis, un joven matemático de Harvard, ha replicado con contundencia la proposición euleriana: no sólo tiene soluciones dicha ecuación, sino que éstas son infinitas.

El Hemisferio Norte está sufriendo epidemias simultáneas de la enfermedad del olmo holandés causadas por dos formas altamente patógenas de *Ophiostoma ulmi*. En España se han detectado frentes epidémicos de la raza NAN en Madrid, Avila y Guadalalajara, entre otras localidades.

La Oficina Norteamericana de Patentes ha concedido a Philip Leder y Timothy Stewart la primera patente de un animal genéticamente alterado. Se trata de un ratón que expresa el oncogén *myc*, implicado en el desarrollo del cáncer de mama. Gracias a sus investigaciones con el ratón *myc*, parece demostrado que la manifestación del cáncer no depende sólo de la expresión de uno o varios oncogenes, sino que hay otras sustancias involucradas.

El Consejo Ejecutivo del Observatorio Meridional Europeo ha dado luz verde a la construcción de un mosaico de cuatro telescopios de ocho metros de diámetro cada uno. Ese instrumento, bautizado con las siglas VLT (que abrevian la expresión inglesa ''very large telescope''), se instalará en el Observatorio chileno de La Silla.

Registros históricos y análisis de carbono 14 y otros isótopos han puesto de manifiesto que el ciclo de actividad magnética solar de 11 años ha sufrido diversas discontinuidades en el pasado. Tal ocurrió, por ejemplo, de 1645 a 1700. Ello se ha confirmado con estudios recientes de berilio 10 en los hielos de la Antártida. Puesto que la concentración de dicho isótopo depende de la acción de los rayos cósmicos galácticos, anticorrelacionados con el ciclo solar, sobre partículas de la alta atmósfera, tales mediciones proporcionan también información sobre la variación del campo geomagnético.

INVESTIGACION Y
CIENCIA

Junio de 1988 Número 141

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Andrés Lewin Richter: *Música por ordenador*; Isabel García Acha y Julio Rodríguez Villanueva: *Lo propio, lo ajeno y la autoinmunidad*; Ramón Pascual: *El paradigma de la membrana en los agujeros negros*; José Luis Araus: *La luz, activadora de genes vegetales*; Amando García Rodríguez: *Los efectos del espín en los gases*; Joandomènec Ros: *El comportamiento de las ballenas*; Manuel Crespo: *Los pólipos de Trembley*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

[La traducción y asesoramiento del artículo *Las manchas del leopardo*, de James D. Murray, publicado en mayo, fueron de José L. Oliver y Manuel Ruiz Rejón]

Ciencia y sociedad:

E. Cervantes

Libros:

Luis Alonso, Emili Elizalde, Juan Ignacio Cuadrado Iglesias y Ginés López

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
14-15	Ian Worpole
16	Andrew Gerzso (*arriba*), Ian Worpole (*abajo*)
17	Ian Worpole
18	Con autorización de Universal Edition, Viena
19-20	Ian Worpole
23	Yaakov Naparstek y Dorit Gurfel
24-25	Joan Starwood
26	Ritta Stanescu, Hôpital des Enfants Malades, París
27-30	Joan Starwood
33-41	Javier Romero
49-50	J. Alonso y A. González Ureña (*arriba*), A. González González, A. González Ureña y Magda Mària (*abajo*)
51-59	A. González González, A. González Ureña y Magda Mària
60	James Kilkelly
62-63	Gabor Kiss
64	James Kilkelly (*arriba*), Gabor Kiss (*abajo*)
66	Gabor Kiss
68-75	George Retseck
79	Pacific Whale Foundation
80-85	Patricia J. Wynne
89-90	Cortesía de Howard M. Lenhoff y Sylvia G. Lenhoff
91	Richard D. Campbell, Universidad de California en Irvine (*arriba*); Tom Prentiss (*abajo*)
92	Cortesía de Howard M. Lenhoff y Sylvia G. Lenhoff
93	Cortesía de M. Archinard, Museo de Historia de las Ciencias, Ginebra
94-97	Laurie Grace
100	David K. Donald
101-102	Michael Goodman
103	Jearl Walker



LA PORTADA muestra un equipo electrónico programable que actúa como elemento integrante de un conjunto de cámara (véase "Música por ordenador", por Pierre Boulez y Andrew Gerszo, en este mismo número). La unidad dirige las señales de audio procedentes de los músicos hacia una unidad de procesamiento (que almacena, manipula y llama formas de onda sonoras digitalizadas) y de éstas a los altavoces. El montaje permite la transformación de los sonidos instrumentales en el momento mismo que los generan los músicos.

(Pintura de Ted Lodigensky.)

INVESTIGACION Y CIÈNCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCIÓN Carlos Oppenheimer, Josep Maria Farré Josa
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
PROMOCIÓN EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)

SCIENTIFIC AMERICAN

DIRECTOR EDITORIAL Jonathan Piel
REDACCIÓN Armand Schwab, Jr. (Subdirector), Timothy Appenzeller, Timothy M. Beardsley, John M. Benditt, Laurie Burnham, David L. Cooke, Jr., Ari W. Epstein, Gregory R. Greenwell, John Horgan, June Kinoshita, Ricki L. Rusting, Karen Wright
DIRECTOR ARTÍSTICO Samuel L. Howard
DIRECTOR DE PRODUCCIÓN Richard Sasso
PRESIDENTE HONORARIO Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	4950	9000
Extranjero	5500	10.000

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 450 pesetas
Extraordinario: 575 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel.652 42 00

para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona
Teléfono 322 05 51

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46

Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3º 3ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45



ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Fotocromos reproducidos por Reprostudy, S. A. Buenos Aires, 51 - 08902 Hospitalet (Barcelona)

Gráfica Elzeviriana, S. A. Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11 - 08013

Barcelona Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

PIERRE BOULEZ y ANDREW GERSZO ("Música por ordenador") colaboran desde 1980 en los aspectos teóricos y prácticos de la aplicación de los ordenadores en música. Boulez dirige el Instituto de Investigación y Coordinación Acústica/Música (IRCAM), preside el Ensemble InterContemporain y es profesor del Colegio de Francia. Estudió composición en el Conservatorio de París y, a partir de 1946 y durante 10 años, fue director musical de la compañía de teatro Renaud-Barrault. En 1956 comenzó a organizar los conciertos del Petit Marigny y del Domaine Musical, dedicados a la música contemporánea. Desde 1960 hasta 1963 enseñó análisis musical y composición. Boulez ha sido director invitado de la Orquesta de Cleveland, director de la Orquesta de la BBC y de la Filarmónica de Nueva York. Gerszo, flautista, coordina en el IRCAM la investigación sobre composición por ordenador y la interacción entre científico y compositor. Cursó estudios de música en el Conservatorio de Nueva Inglaterra, licenciándose por el Instituto de las Artes de California. Desde 1974 hasta 1976 estudió en el Real Conservatorio de La Haya. Ha ocupado, desde 1977, diversos cargos en el IRCAM.

IRUN R. COHEN ("Lo propio, lo ajeno y la autoinmunidad") ocupa la cátedra Mauerberger de Inmunología del Instituto Weizmann de Ciencias de Israel. Nacido y educado en Chicago, se licenció en medicina por la Universidad del Noroeste. Tras la residencia pasó dos años en el entonces denominado Centro de Enfermedades Infecciosas, de Atlanta, y se especializó en pediatría en el Hospital Johns Hopkins. En 1968 se trasladó al Instituto Weizmann, donde ha permanecido desde entonces, salvo un período, a comienzos de la década de 1970, en el que colaboró en la creación de la facultad de medicina de la Universidad Ben-Gurion en Beer-Sheva. Cohen y su familia han costeado, y ayudan a sostener, una biblioteca infantil y un centro cultural dedicados a la hija mayor de Cohen, Michal, que murió en accidente de coche a la edad de 17 años.

RICHARD H. PRICE y KIP S. THORNE ("El paradigma de la membrana en los agujeros negros") colaboran desde que Price fue alumno de licenciatura de Thorne. Price es profesor de física de la Universidad de Utah, a la que se incorporó en 1971. Licenciado en ingeniería por la Universidad de Cornell, se doctoró por el Instituto de Tecnología de California (Caltech). El objetivo principal de sus investigaciones es la astrofísica relativista, si bien recientemente ha empezado a colaborar en trabajos de diseño ingenieril sobre problemas de dispositivos micromecánicos. Thorne ocupa la cátedra William R. Kenan, Jr., y enseña física teórica en el Caltech, por el que se licenció en 1962. En 1965 se recibió de doctor por la Universidad de Princeton, en la que, durante un año, realizó trabajos de postdoctorado, trasladándose al Caltech como becario.

ANGEL GONZALEZ UREÑA ("Reacciones químicas y haces moleculares") es catedrático de química física de la Universidad Complutense de Madrid, centro superior por el que se doctoró, en 1972, con premio extraordinario. Realizó investigaciones posdoctorales en la Universidad de Madison en Wisconsin y en la de Texas en Austin. Ha impartido docencia en las Universidades inglesas de Cambridge y Manchester, en la Johns Hopkins estadounidense y en la canadiense de Toronto. Dirige un equipo de investigación sobre haces moleculares, láseres y reacciones químicas en la Complutense y es autor de múltiples publicaciones, entre ellas *Advances in Chemical Physics* y *Cinética y dinámica molecular de las reacciones químicas*. Pertenece a distintas sociedades internacionales de la especialidad.

PHYLLIS B. MOSES y NAM-HAI CHUA ("La luz, activadora de genes vegetales") comparten su interés por la biología vegetal. Este mismo año, Moses ha sido nombrada jefe de adquisiciones de Academic Press, Inc. Licenciada en biología por la Universidad Johns Hopkins en 1977, se doctoró en genética molecular por la Rockefeller en 1983, en la que realizó trabajos de postdoctorado becada por la Fundación Nacional de las Ciencias; en 1985 se trasladó al Consejo Nacional de Investigaciones, para trabajar sobre política agrocientífica. Chua es catedrático y director del Laboratorio de Biología Vegetal y Molecular de la Universidad Rockefeller. Se licenció por la Universidad de Singapur en 1965, doctorándose por la de Harvard en 1969. Continúa en la Universidad Rockefeller desde 1971.

FRANCK LALOË y JACK H. FREED ("Los efectos del espín en los gases") estudian los fluidos cuánticos con espines polarizados. Laloë, investigador de la Escuela Normal de París, es coautor de un libro de texto sobre mecánica cuántica y clarinetista aficionado. Freed enseña química en la Universidad de Cornell, desde 1963. En 1958 se licenció por la Universidad de Yale y, en 1962, la de Columbia le otorgó el doctorado en química física; pasó luego un año en Cambridge. Ha sido profesor visitante de varias universidades.

BERND WÜRSIG ("El comportamiento de las ballenas") enseña biología marina en los Laboratorios Marinos Moss Landing, de la Universidad estatal de California. Doctor en comportamiento y ecología por la estatal de Nueva York en Stony Brook en 1978, investigó en la Universidad de California en Santa Cruz antes de incorporarse a Moss Landing. Würsig ha dedicado al estudio de las ballenas del Artico los últimos ocho años.

HOWARD M. LENHOFF y SYLVIA G. LENHOFF ("Los pólipos de Trembley"), son matrimonio y colaboraron en la traducción al inglés de las *Mémoires* de Abraham Trembley sobre la hidra. Howard Lenhoff es profesor de biología celular y del desarrollo de la Universidad de California en Irvine y ha investigado todas las fases del ciclo de la hidra. Se recibió de doctor por la Universidad Johns Hopkins en 1955 y ha proseguido sus trabajos en varias instituciones, entre otras, la Carnegie de Washington, la Universidad de Miami y el Instituto Weizmann de Ciencias de Israel. Sylvia Lenhoff se halla adscrita al departamento de biología celular y del desarrollo. Se licenció en historia por el Goucher College y, en 1954, fue becaria Woodrow Wilson en Radcliffe-Harvard.

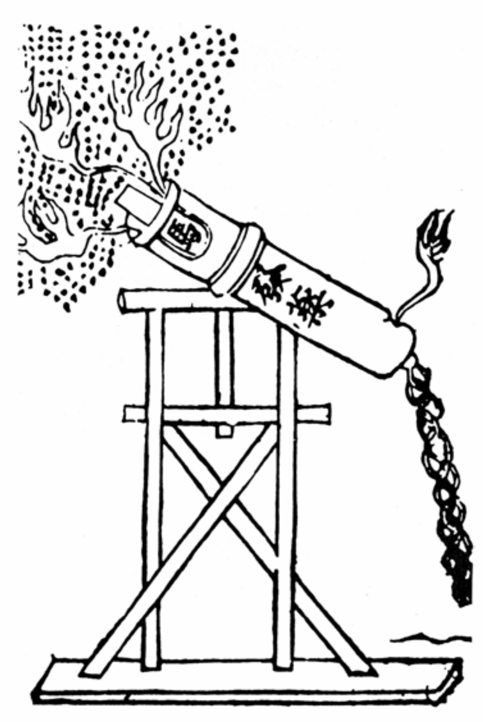
Hace...

José M.ª López Piñero

...cuatrocientos años

Aparecieron cuatro ediciones de la *Historia de las cosas más notables, ritos y costumbres del gran Reyno de la China*, de Juan González de Mendoza: la séptima en castellano, la novena en italiano y las primeras en francés e inglés. Ello refleja la extraordinaria difusión de esta obra, la primera gran síntesis europea acerca de China y su cultura. Publicada originalmente en 1585, solamente durante los quince años restantes del siglo tuvo cuarenta y seis ediciones en siete idiomas.

Juan González de Mendoza nació en 1545 en la localidad riojana de Torrecilla de Cameros. A los diecisiete años se trasladó a México, donde permaneció casi una década. En 1564 ingresó en la Orden de San Agustín, residiendo a partir de entonces en el convento que ésta tenía en Michoacán, dedicado principalmente a su formación filosófica, científica y teológica, así como a colaborar en la enseñanza elemental. Como dice Félix García, dicho convento "era por entonces un punto de apoyo y escala obligada para los agustinos que iban para Filipinas... por él pasaban viajeros y exploradores y, como es lógico, el tema más frecuente de comentarios y nuevas eran los descubrimientos y maravillas que de las tierras exploradas se decían".



Juan González de Mendoza reconoce en su obra la prioridad de la técnica china respecto a la europea en invenciones de tanta transcendencia como la artillería y la imprenta. Grabado chino medieval que representa una pieza de artillería

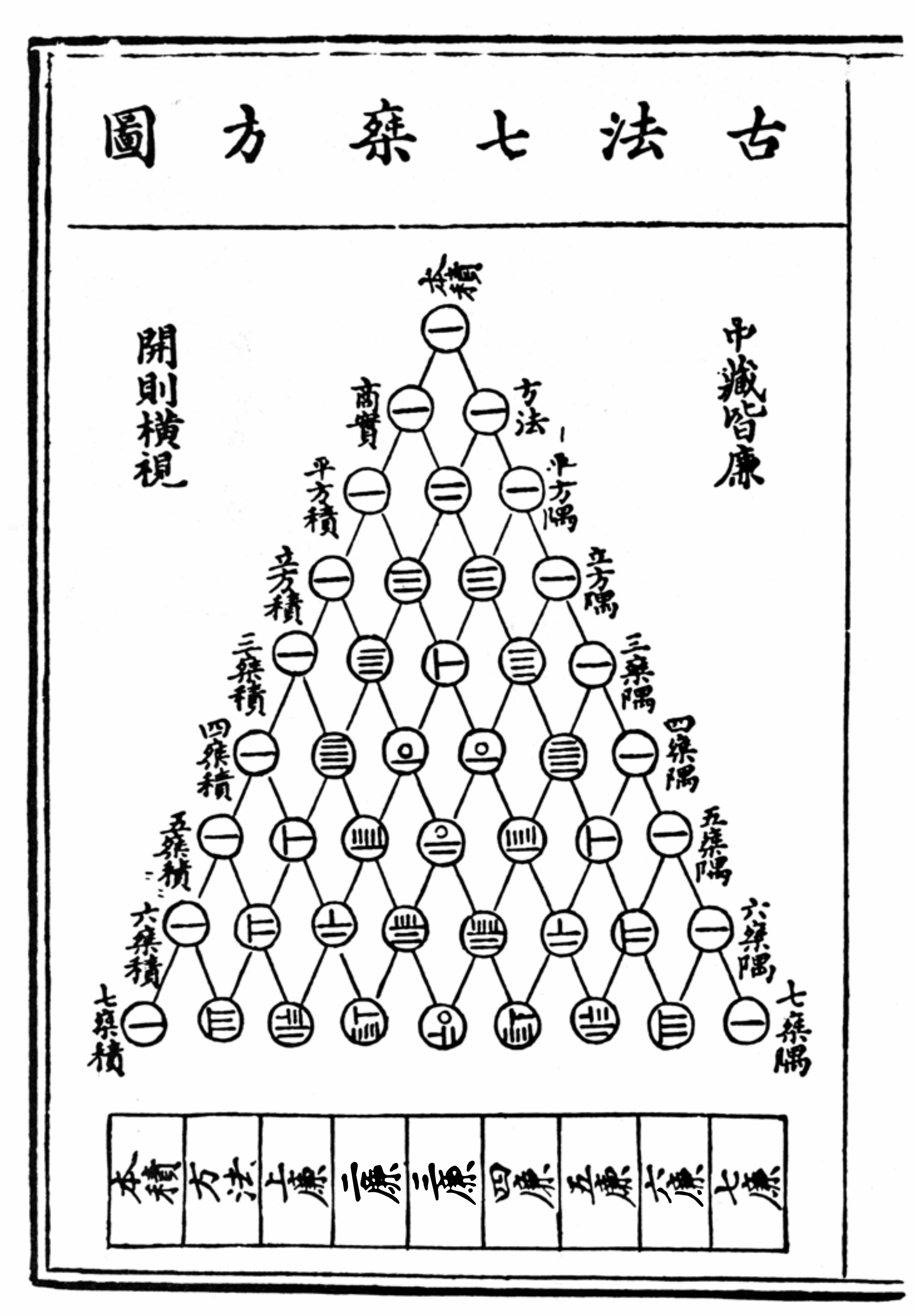
China era una de las principales metas de los proyectos de los misioneros, exploradores y comerciantes españoles que entonces residían en Filipinas. En 1574, González de Mendoza acompañó al provincial de su orden en dichas islas en un viaje a España para solicitar a Felipe II el envío de una embajada al emperador chino. El monarca autorizó únicamente en esta ocasión el viaje de cuarenta religiosos, que partieron de Sevilla, a comienzos del año siguiente. González de Mendoza se quedó en la metrópoli hasta 1581, perfeccionando primero su formación en Salamanca y ocupando más tarde diferentes cargos en varios conventos de los frailes agustinos.

En 1580 se volvió a presentar a Felipe II la petición de que enviara una embajada al emperador chino, adjuntándose con la solicitud la "relación" del viaje que en 1577 había hecho un grupo de españoles encabezado por el agustino Martín de Rada. Esta vez, el rey consideró oportuna la iniciativa y el Consejo de Indias nombró a González de Mendoza para llevarla a cabo. El agustino riojano preparó cuidadosamente el viaje, pero diversas dificultades le impidieron finalmente realizarlo. Había reunido, sin embargo, una amplia información acerca de China y decidió darla a conocer en un libro, que redactó en 1584 durante su estancia en Roma y que se imprimió por vez primera en esta ciudad el año siguiente.

Durante el resto de su vida, González de Mendoza ocupó puestos eclesiásticos cada vez más importantes en España, Italia y América. Murió en 1618, siendo obispo de Popayán, en la actual Colombia.

El título completo del libro de González de Mendoza resume de modo muy expresivo sus fuentes y su contenido: *Historia de las cosas más notables, ritos y costumbres del gran Reyno de la China, sabidas assi por los libros de los mesmos chinos, como por relación de religiosos y otras personas que an estado en el dicho Reyno... Con un itinerario del Nuevo Mundo.* Una de las fuentes principales de la obra fue, en efecto, una serie de textos chinos de diversas materias procedentes, sobre todo, del viaje de Martín de Rada antes mencionado y que González de Mendoza pudo leer "traducidos en nuestra lengua por intérpretes que son chinos de nación". En segundo lugar, utilizó numerosas "relaciones" de viajes a China, entre ellas, la de Martín de Rada (1577), la del viaje de Filipinas a China de Pedro de Alfaro (1579) y el *Itinerario* de España a China y de China a España de Martín Ignacio (1584), que ofrece de forma resumida en la segunda parte de la obra. También recogió abundantes testimonios personales, que procuró someter a crítica, omitiendo "todas las cosas en que hallo dificultad para ser creídas y no tengo original muy cierto a quien alegar o dar por fiador". Para la parte geográfica recurrió asimismo a libros impresos, especialmente al *Discurso de la navegación que los Portugueses hazen a los reinos y provincias de Oriente y de la noticia que se tiene de las grandezas del reino de la China,* que Bernardino de Escalante había publicado en Sevilla en 1577. Más que a los aspectos propiamente geográficos, la obra de González de Mendoza está dedicada a la descripción de la cultura china, incluida la ciencia y la técnica. Se detiene, por ejemplo, en las obras públicas, dando noticia de la gran muralla: "Hallase en este Reino una cerca o muralla que tiene 500 leguas de largo, que comienza desde la ciudad de Ochyoy, que es entre dos altísimas sierras y discurre de Poniente a Levante. Hízola un Rey llamado Tzintzom, por ampararse de los tártaros, con quien tenía guerra, y así toma la muralla toda la frontera de Tartaria. Pero háse de entender que las 400 leguas que tiene la dicha muralla son hechas por la naturaleza, porque son unas sierras altísimas muy cerradas. Las otras ciento, que fue cerrar una distancia que había de las unas a las otras, hizo con arte humana el sobredicho Rey, de muy fuerte cantería, y de siete brazas de ancho por el cimiento, y otras siete de altura. Comienza por la parte del mar en la provincia de Cantón, y va por la de Paguía y Cansay, y fenece en la de Susuam".

González de Mendoza reconoce la



Entre los libros chinos utilizados por González de Mendoza para redactar su obra figuraban los "de Matemáticas y cuentas, y reglas para saberlas bien". Página de un tratado chino de comienzos del siglo XIV *en el que aparece el triángulo llamado en Europa "de Pascal"*

importancia de la técnica china y su prioridad respecto a la europea en invenciones de tanta transcendencia como la artillería y la imprenta. Titula uno de sus capítulos *De cómo muchos años antes que en la Europa se usó en este Reyno la invención de la artillería,* en el que afirma: "Ninguna cosa de las que se contienen en este libro, ni de otras muchas que por usar de brevedad se dejan de poner, causó tanta admiración a los portugueses, cuando comenzaron a contratar en Cantón, ni a nuestros castellanos, que mucho después fueron de las Islas Filipinas a la China, como fue hallar en este Reino artillería, y entender según buena cuenta, sacada de sus historias y de las nuestras, que el uso de ella era en él mucho más antiguo que en las de Europa, donde tuvo principio al año de 1330, por industria de un alemán, cuyo nombre ninguna historia declara; el cual, según lo que dicen estos chinos y se ve evidentemente, no merece nombre de inventor, sino de descubridor; pues se precian ellos de haber sido los primeros que la inventaron, y de donde se comunicó el uso de ella a los reinos que el día de hoy la tienen".

De forma parecida, otro capítulo se titula *De cuánto más antigua es la costumbre de estampar los libros en este Reyno que en nuestra Europa:* "Fue tan sutil e ingeniosa la admirable invención de la estampa que es cosa cierta, si faltara ella, pereciera mucha parte de la memoria de tantos insignes varones como los felices tiempos de atrás poseyeron; y muchos de los que ahora son, no se fatigaran tanto con la codicia de ganar honra, en letras o armas, si solamente su memoria hubiera de durar igualmente que su vida, o poco más. Dejado esto aparte y los grandes efectos de esta útil invención, que quererlos decir fuera alargarme mucho, trataré solamente de probar lo que el capítulo propone, con algunos ejemplos de muchos que en sus historias se hallan y en las nuestras; bastantes para que quede claro. Según parece por la común opinión, la invención de estampar comenzó en Europa el año de 1458. La cual se atribuye a un tudesco llamado Joan Gutenbergo, y se tiene por cosa cierta que el primer molde con que se imprimió fue el que escribió San Agustín que se intitula de *La ciudad de Dios*, y en esto concuerdan graves autores. Pero, según los chinos afirman, su primer principio fue en su Reino, y el inventor un hombre a quien ellos reverencian por santo, de donde se derivó y trajo, muchos años después que ellos tenían el uso, al Reino de Alemania por la Rusia y Moscovia; por donde tienen por muy cierto se puede venir por tierra, y que mercaderes que venían de allá al dicho Reino por el mar Bermejo y Arabia la Feliz, trajeron libros de donde el Joan Gutenbergo, a quien las historias hacen autor, tomó motivo. Lo cual siendo así verdad, como ellos tienen autentizado, queda muy claro que esta invención vino y se comunicó de ellos a nosotros; y ayuda para creer esto hallarse el día de hoy entre ellos muchos libros estampados más de quinientos años antes del año en que por nuestra cuenta tuvo principio la invención en Alemania; de los cuales tengo yo uno, y he visto otros muchos así en las Indias como en España e Italia".

Además de informar sobre otros aspectos de la técnica china, como la construcción naval y los métodos de pesca, González de Mendoza se ocupa de la enseñanza en todos los niveles, de la escritura y de la edición de libros. Nuestro agustino llega incluso a ofrecer una lista de las materias sobre las que

trataban los textos que habían traído Martín de Rada y sus compañeros en su viaje de 1577:

"Los libros que trajeron eran en gran número, como hemos dicho, y trataban de diversas materias, como se verá de lo que sigue. De la descripción de todo el Reino de China, y a qué parte está cada una de las quince provincias, el largo y ancho de cada una de ellas y los Reinos con quien confinan.

"De los tributos y rentas del Rey, y el orden de su Palacio Real y de los salarios ordinarios que da; con los nombres de todos los oficiales de su Casa, y hasta dónde se extiende el poder de cada uno de ellos.

"De los tributarios que tiene cada provincia, y el número de los que son libres de pagar el tributo; y los tiempos y el orden como se ha de cobrar.

"Para hacer navíos de muchas maneras, y de cómo se ha de navegar, con las alturas de los puertos y la calidad de cada uno en particular.

"Del tiempo y antigüedad del Reino de la China, y del principio del mundo y en qué tiempo y por quién comenzó. De los Reyes que ha tenido el Reino y cómo han sucedido en él, y de la manera y modo que han tenido en gobernar, con la vida y costumbres de cada uno.

"De las ceremonias con que han de ofrecer sacrificios a los ídolos, que ellos tienen por dioses, y los nombres de cada uno de ellos y el principio que tuvieron, y los tiempos en que se ha de hacer los tales sacrificios.

"De lo que sienten de la inmortalidad del ánima, del cielo y del infierno, y del modo de sepultar a los difuntos y las exequias que por ellos se han de hacer, con los lutos que cada uno es obligado a traer según el deudo que con el difunto tenía.

"De las leyes que tiene el Reino, y en qué tiempos y por quién fueron hechas y las penas que por el quebrantamiento de ellas se han de dar, con otras muchas cosas tocantes a buen gobierno.

"Muchos libros de hierbas medicinales, y cómo se han de aplicar para que aprovechen y sanen las enfermedades.

"Otros muchos de Medicina de autores de aquel Reino, antiguos y modernos, con el orden que los enfermos han de tener para sanar de las enfermedades, y para preservarse de caer en ellas.

"De propiedades de piedras y metales, y de cosas naturales que tienen en sí alguna virtud, y de las cosas para que las perlas, el oro, la plata y los demás metales pueden servir a la vida humana, comparando entre los unos y los otros la utilidad de cada cosa.

"Del movimiento de los cielos y de su número; de los planetas y estrellas y de sus efectos e influencias particulares. De todos los reinos y naciones de quien tienen noticia, y las cosas particulares que de cada uno se saben.

"De las vidas que hicieron los hombres a quienes ellos tienen por santos, y adónde pasaron su vida, y dónde murieron y están enterrados.

"De cómo se ha de jugar a las tablas y al ajedrez, y cómo han de hacer juegos de manos y títeres.

"De música y cantares, con los nombres de los inventores.

"De Matemáticas y cuentas, y reglas para saberlas bien.

"De los efectos que hace la criatura en el vientre de la madre, y de cómo está cada mes y se sustenta, y cuáles son buenos o malos tiempos para su nacimiento.

"De Arquitectura, y para todas las maneras de fabricar; con el ancho y largo que el edificio ha de llevar para que tenga proporción.

"De las propiedades de la buena o mala tierra, y las señas para conocerla; y qué cosas llevará bien cada una.

"De Astrología natural y judiciaria, y reglas para aprenderla y levantar figuras para echar juicios.

"De Quiromancía y Fisionomía y otras señales, y lo que cada una significa.

"Del estilo para escribir cartas, y los títulos que se han de dar a cada uno, según la dignidad o calidad de su persona.

"De cómo se han de criar los caballos, y para enseñarles a correr y caminar.

"Para adivinar por sueños y echar suertes, cuando comienzan algún camino o hacen alguna obra cuyo fin es dudoso.

"De los trajes de todos los del Reino, comenzando del Rey y las insignias de los que gobiernan.

"Para hacer armas e instrumentos de guerra, y para saber formar escuadrones.

"Estos y muchos trajeron los dichos Padres, de donde, como he dicho, se han sacado las cosas que se han dicho y dirán en este libro de historia, interpretadas por personas nacidas en la China y criadas en las Islas Filipinas en compañía de los españoles que en ellas residen. Los cuales afirmaron haber visto muchas y muy grandes librerías en las ciudades adonde llegaron, en especial en Aucheo y Chincheo."

Música por ordenador

Los ordenadores generan sonidos que los instrumentos acústicos no pueden reproducir. Los sonidos de una y otra fuente pueden quedar integrados en una pieza musical si el compositor y los técnicos colaboran para dar cuerpo a las ideas

Pierre Boulez y Andrew Gerzso

Hasta ahora los compositores dispusieron de un solo medio a través del cual expresar sus ideas musicales y éstas llegaran al público: los sonidos emitidos por los instrumentos tradicionales. El advenimiento de los ordenadores y otras unidades de proceso de señales digitales ponen hoy al alcance nuevos medios de expresión musical. El compositor que utilice estos equipos electrónicos sólo se verá coartado por su propia imaginación en la creación de una "orquesta" de sonidos.

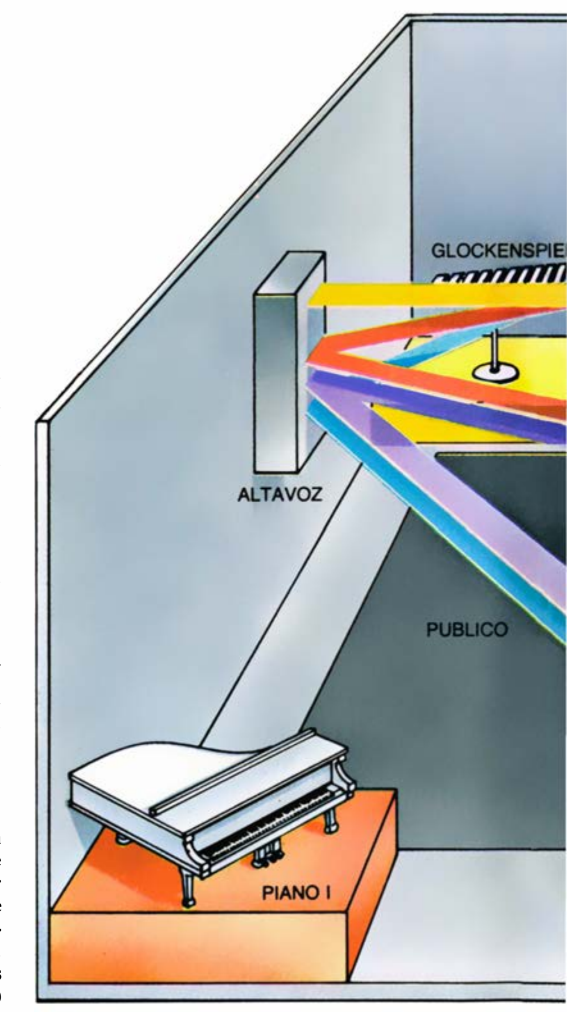
La música en la que se pretende la integración de los sonidos generados por ordenador con los de los instrumentos al uso supone un gran reto para un compositor. El compositor, además de expresar las ideas musicales de forma convincente, debe hacerlo de suerte que sean fácilmente traducibles a ambos medios. Ideas que poseerán la flexibilidad suficiente para pasar de un medio a otro en el curso de la interpretación. Si así no fuera, el oyente cuestionaría el papel del ordenador ante la misión de los instrumentos tradicionales y quedaría confundido por la falta de coherencia, si es que no la rechaza.

La búsqueda de posibles interrelaciones musicales entre el ordenador y los instrumentos tradicionales requiere una estrecha comunicación entre el compositor y los técnicos que diseñan el soporte físico y los programas de ordenador. Merced a esa colaboración se crean dispositivos electrónicos de utilidad para la voluntad inmediata del compositor, al tiempo que se evita una excesiva especialización, dejando un margen de flexibilidad para la futura investigación musical —una tarea difícil, dada la naturaleza compleja de toda composición musical, que no suele corresponderse con la complejidad técnica requerida para su realización. Sucede a menudo que lo que parece un sencillo problema musical constituye, en realidad, un desafío tecnológico formidable.

Quizá sea ésta la primera vez en la historia que un compositor haya tenido que explicar y formalizar cómo desarrolla y manipula conceptos, temas y relaciones en un contexto musical a fin de que los técnicos (cuya formación musical puede ser escasa) les den cuerpo. Ante esta suerte de problemas hemos de enfrentarnos en el Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique (IRCAM). El Instituto, adscrito al Centro Georges Pompidou de París, está dedicado a la investigación musical y científica para la integración de la expresión instrumental tradicional con las nuevas formas de expresión alcanzables con los ordenadores.

Podemos abordar la relación entre uno y otro medio siguiendo diferentes caminos. Cierta línea de trabajo investiga modelos de emisión de sonidos característicos de los instrumentos habituales, modelos que pueden luego aplicarse a la síntesis de una gama de sonidos afines a los sonidos instrumentales o, por contra, muy alejados de ellos [véase "El ordenador, instrumento musical", de Max V. Mathews y John R. Pierce; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1987]. Se trata de lograr que el compositor escriba música para el ordenador como si fuera un instrumento tradicional, especificando los tipos de sonido que ha de obtener el operador del aparato y cuándo y cómo se han de emitir. Otra línea de estudio investiga la modificación de los sonidos de los instrumentos tradicionales. Mediante ese enfoque, se dilata el campo de las posibilidades musicales del conjunto entero, trascendiendo de golpe los límites humanos e instrumentales.

Para crear un sonido con el ordenador hay que generar una secuencia de números binarios, denominados muestras, que describen la morfología



1. "ESPACIALIZACION" DE LOS SONIDOS producidos por seis solistas instrumentales cuando entran simultáneamente en *Répons*, una composición creada por uno de los autores (Boulez). Se consigue mediante la circulación del sonido por cuatro altavoces, siguiendo un recorrido señalado con una flecha del color correspondiente al del instrumento solista. La velocidad con la que se mueve cada sonido por la sala de conciertos es directamente proporcional a la intensidad del mismo. Ahora bien, los sonidos de los instrumentos decaen a distintas tasas; por tanto, la velocidad de los sonidos descenderá también a diferentes tasas. Varios técnicos sentados ante una consola situada detrás del conjunto instrumental controlan las unidades electrónicas y de audio que posibilitan esos efectos. (*Répons* era un tipo de música coral antifonal.)

ondulatoria del sonido: las fluctuaciones de la presión del aire que modulan el sonido en función del tiempo. Las muestras pueden escucharse si se convierten en una secuencia de voltajes proporcionales, "suavizando" y amplificando la serie de potenciales discretos y remitiendo la señal eléctrica al altavoz. El número de muestras que el ordenador debe generar para cada segundo de sonido, denominado tasa de muestreo, depende del componente más alto que presente la frecuencia de las fluctuaciones de la presión de aire que configuran el sonido. Ciñéndonos a un caso típico, eso significa que, para sintetizar o transformar un sonido, el ordenador debe hallarse capacitado para generar o manejar en un segundo entre 16.000 y 40.000 muestras, cada una de las cuales puede requerir varias fases de cálculo.

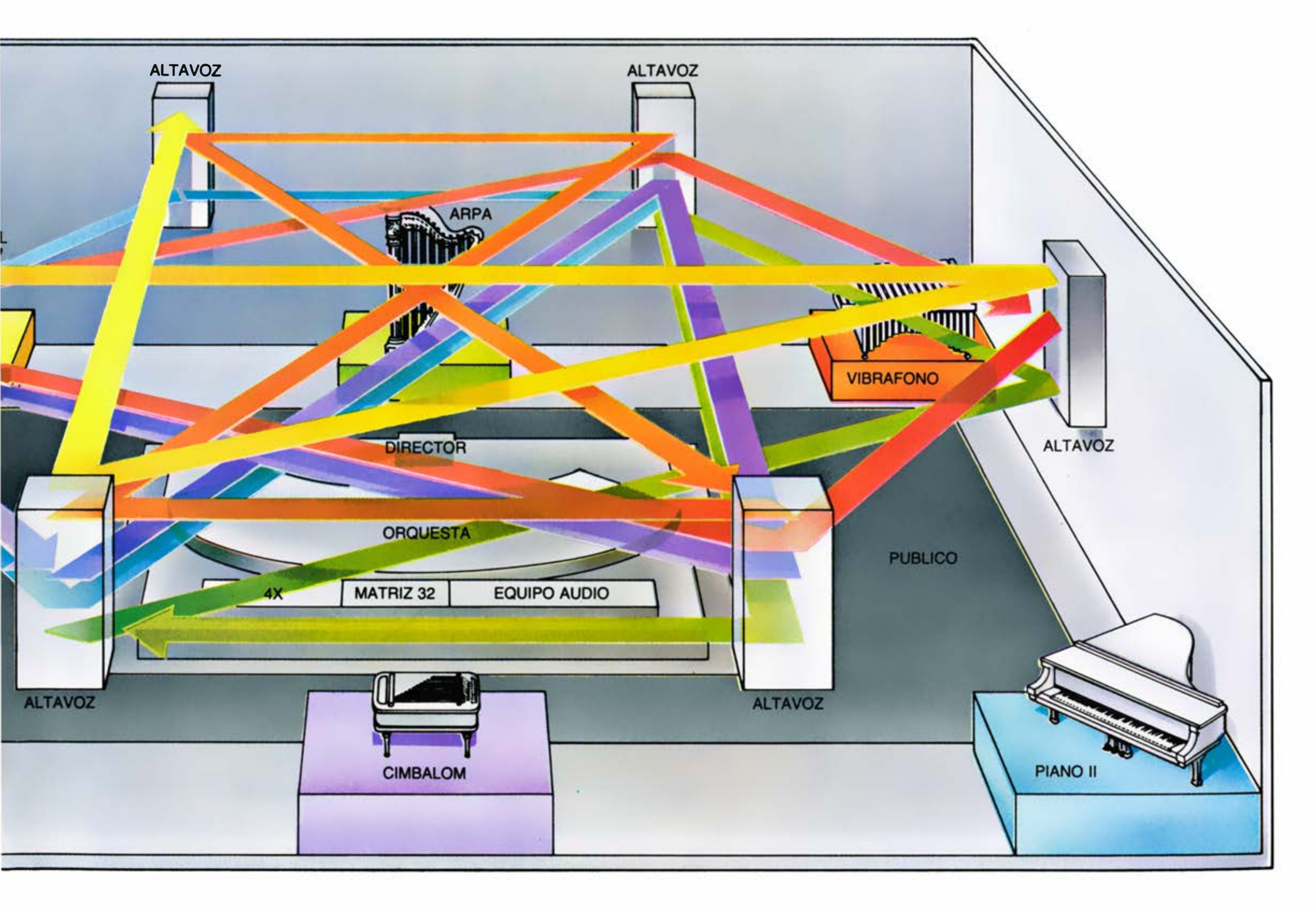
Hasta hace poco, este proceso de ordenador se realizaba con una lentitud enojosa. El compositor que quisiera combinar sonidos generados por ordenador con sonidos producidos en directo debía grabar previamente en cinta los sonidos procesados para reproducirlos después durante la interpretación en la que intervenían los instrumentistas. Ahora bien, el magnetófono carece de flexibilidad en su patrón temporal, propiedad imprescindible de los conciertos en directo. El tratamiento del tiempo de una pieza es característica fundamental de la música. Además, las grabaciones pueden decepcionar al público, que disfruta viendo a los músicos tocar sus instrumentos en el escenario.

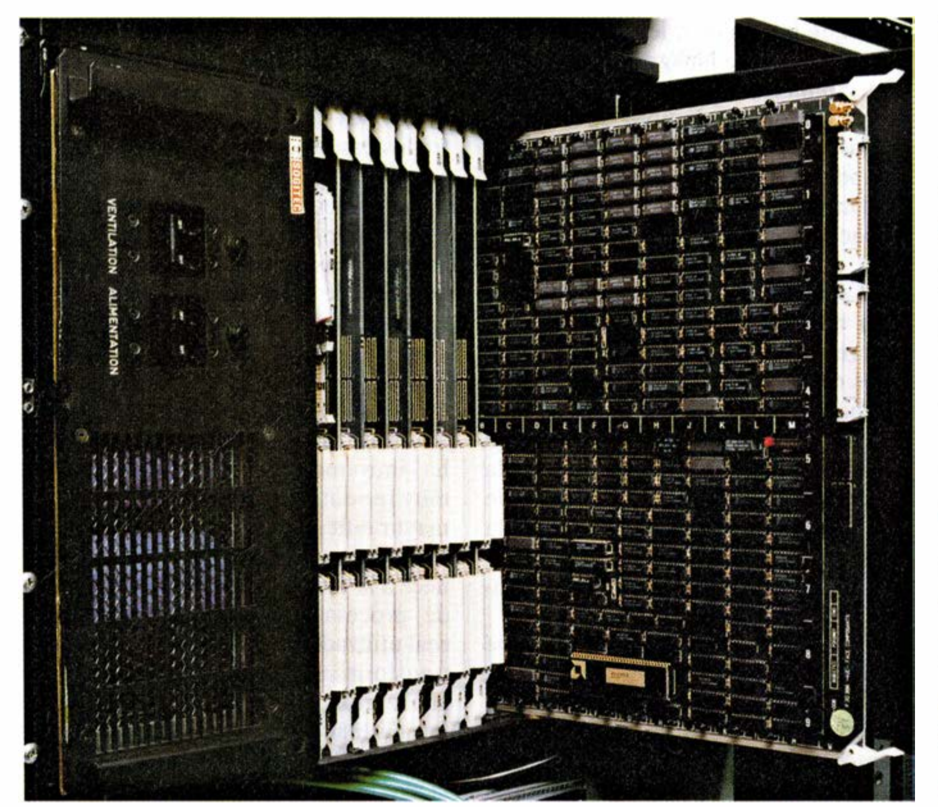
La rapidez y potencia de los ordenadores actuales permite sintetizar sonidos originales o transformar sonidos instrumentales en "tiempo real": al compás de los instrumentistas. Ahora los compositores pueden conjugar la intervención del ordenador con la de los otros instrumentos y derribar así la barrera, un tanto artificial, que se levantaba entre un tipo y otro de instrumentos.

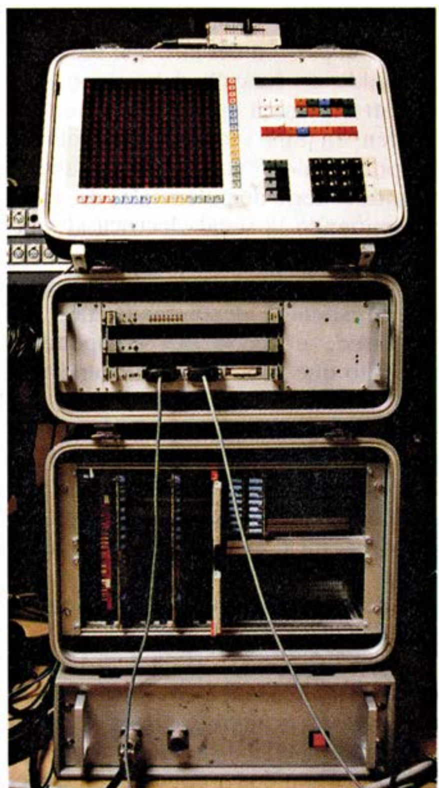
La transformación en tiempo real de los sonidos instrumentales reviste particular interés por diversas razones. Modificando el sonido de los instrumentos tradicionales, una vez producido por el músico, permite al compositor explorar un territorio musical desconocido, aun cuando se interpreten las partituras con las que compositor y público están familiarizados. El contraste entre lo familiar y lo no familiar puede estudiarse fácilmente creando relaciones de proximidad y lejanía entre los pasajes instrumentales en que se sigue la partitura tal cual y su transformación mediante el ordenador. Además, como las transformaciones son instantáneas conservan toda la espontaneidad de la interpretación en directo (junto con las imperfecciones humanas).

El equipo de modificación electrónica del sonido en tiempo real se ha introducido, en versión portátil, muy recientemente. Hoy se traslada sin mayor dificultad a la sala de conciertos. Uno de estos aparatos, el 4X, pertenece a la cuarta generación de una serie de procesadores digitales en tiempo real utilizados en el IRCAM, no sólo para transformar sonidos sino también para analizarlos y sintetizarlos. El prototipo fue diseñado y construido en el IRCAM en 1980 por Giuseppe di Giugno, con la ayuda de Michel Antin; la versión final fue fabricada en 1984 por la compañía francesa SOGITEC.

El 4X, capaz de realizar hasta 200







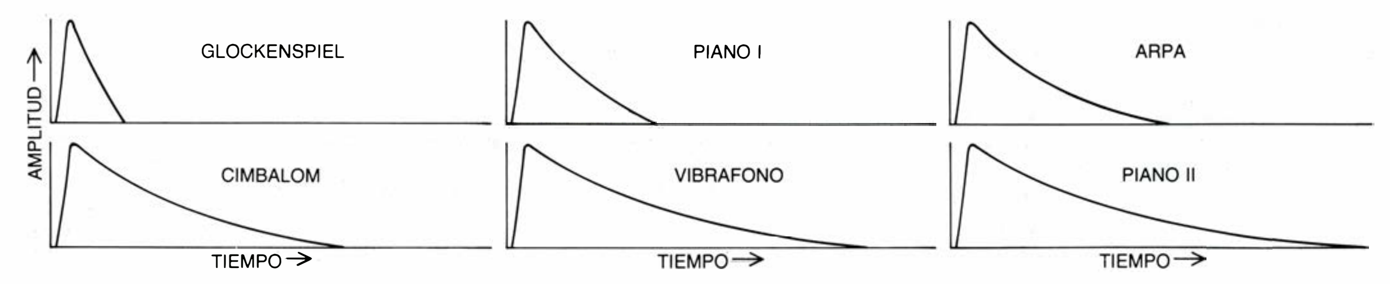
2. UNIDADES ELECTRONICAS que intervienen con pleno derecho en la interpretación de *Répons*: 4X (*izquierda*) y Matrix 32 (*derecha*). El 4X consta de ocho paneles de procesadores, cada uno de los cuales puede programarse de manera independiente para almacenar, manipular y memorizar formas de ondas sonoras digitalizadas: secuencias de números que corresponden a las fluctuaciones de presión de aire de un sonido. La Matrix 32 viene a ser un controlador programable de tráfico de señales audio; dirige las señales de los solistas al 4X y del 4X a los altavoces y se reorganiza en una décima de segundo.

millones de operaciones por segundo, consta de ocho procesadores, cada uno de los cuales puede programarse independientemente con cualquier combinación de métodos para el proceso de señales digitales. Con la técnica de síntesis aditiva, los sonidos musicales se generan por suma de un gran número de ondas sinusoidales. Cada unidad del 4X es capaz de generar 129 de estas formas de onda. Puede programarse cada unidad para disponer de hasta 128 filtros distintos y utilizarlo para transformar sonidos en tiempo real. Las unidades de proceso disponen también de un catálogo de ondas memorizadas, que permite almacenar hasta cuatro segundos de sonido y reproducirlo siguiendo cualquier pauta rítmica.

Las operaciones básicas que se necesitan para manipular las formas de onda digitales están codificadas en los módulos o subprogramas integrados, que se interconectan de manera tal que la salida de un módulo constituye la entrada de otro. Los propios módulos, así como sus interconexiones, se programan por medio de "cables", que son programas de más alto nivel escritos en un lenguaje máquina, diseñado por uno de los autores (Gerszo) y puesto a punto por Patrick Potacsek y Emmanuel Favreau. (Los conceptos de "cable" y "módulo" son residuos de los días de los sintetizadores de sonido analógicos, que utilizaban cables reales para interconectar los módulos oscilador, amplificador y filtro.)

Los cables se almacenan en un disco magnético en la máquina nodriza del 4X, al que pueden pasar en medio segundo o menos. La máquina nodriza utiliza también un sistema operativo en tiempo real y un programa de sucesos (desarrollado por Miller Puckette, Michel Fingerhut y Robert Rowe) que indica al 4X qué programa ha de ejecutar y cuándo. De esta manera pueden cargarse uno detrás de otro cierto número de cables distintos durante un concierto, cada uno de los cuales "reorganiza" el 4X en una fracción de segundo. La música requiere este tipo de flexibilidad.

Las interpretaciones musicales en un gran auditorio requieren también flexibilidad en la interconexión y en la dis-



3. ENVOLVENTES DE LAS FORMAS DE ONDA de los sonidos. Las envolventes reflejan la variación, en función del tiempo, de las amplitudes o las intensidades de los sonidos. Las envolventes producidas por cada uno de los seis instrumentos solistas en *Répons*, parecidas en su forma, presentan un arranque muy brioso seguido de una extinción o final suave. El tiempo de la extinción dependerá de la altura del sonido y del instrumento en que se genere.

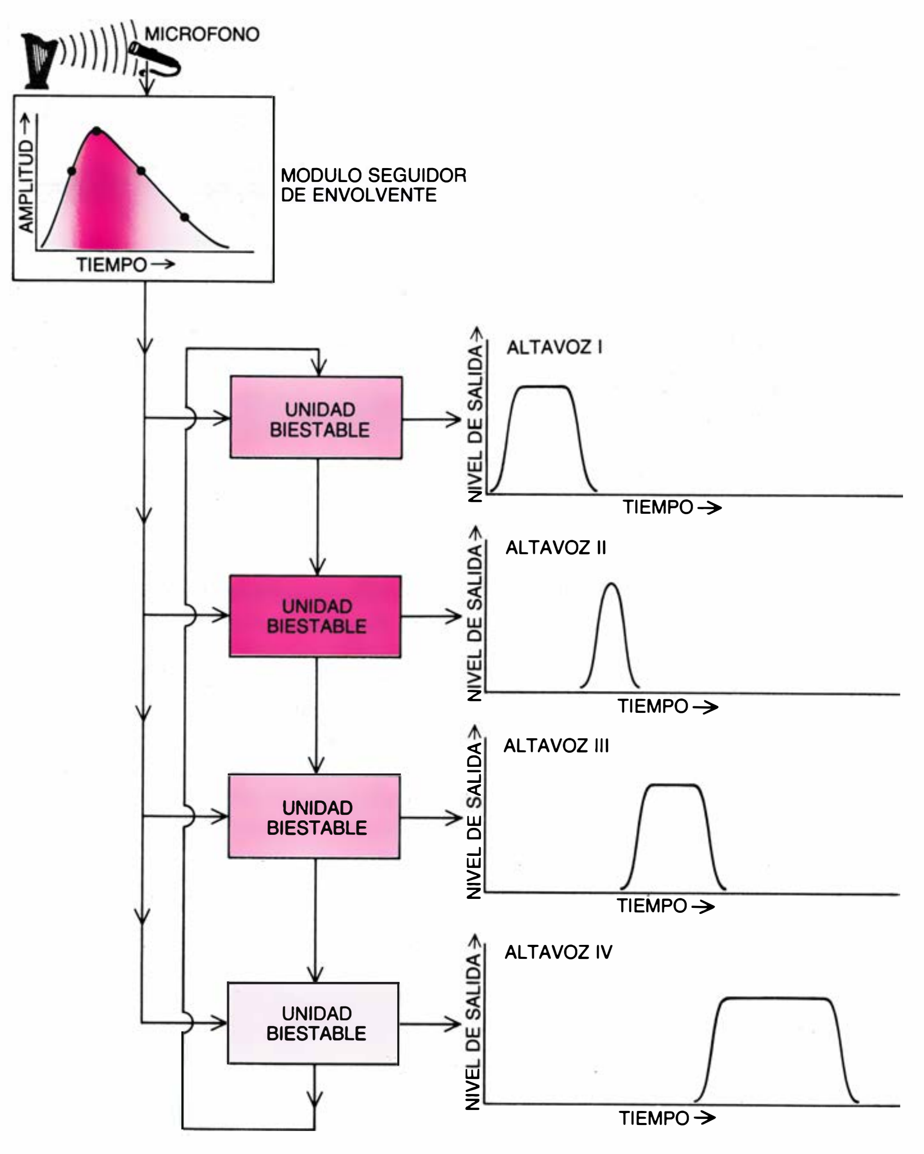
tribución de sonidos entre los distintos altavoces. Esta función compete a otra unidad electrónica, desarrollada también en el IRCAM: la Matrix 32. La unidad, diseñada y construida por Michel Starkier y Didier Roncin, controla el tráfico de señales acústicas: establece las conexiones entre un conjunto de entradas (las señales provenientes de los micrófonos o del 4X) y una serie de salidas (las señales que van al 4X o a los altavoces) y especifica también el nivel de las señales de salida. Con los programas escritos por uno de nosotros (Gerszo) es posible en cualquier momento preparar el aparato para que envíe el sonido de un solista a un determinado altavoz y así se amplifique. En otro instante se puede enviar el sonido de cada solista hacia los distintos módulos del 4X y dirigir después los sonidos transformados hacia diferentes altavoces. La Matrix 32 puede reorganizarse en una décima de segundo aproximadamente.

Tanto el 4X como la Matrix 32 actúan de intérpretes de pleno derecho en *Répons*, una composición escrita por uno de los autores (Boulez), para seis solistas instrumentales, orquesta de cámara y procesadores de señales digitales en tiempo real. La obra fue encargada por la Radio del Sudoeste de Alemania y estrenada en Donaueschingen, Alemania Federal, en 1981. Más recientemente ha sido interpretada, en 1986, en el transcurso de una gira por cinco ciudades en los Estados Unidos que realizó el Ensemble InterContemporain, un grupo vanguardista francés de música de cámara.

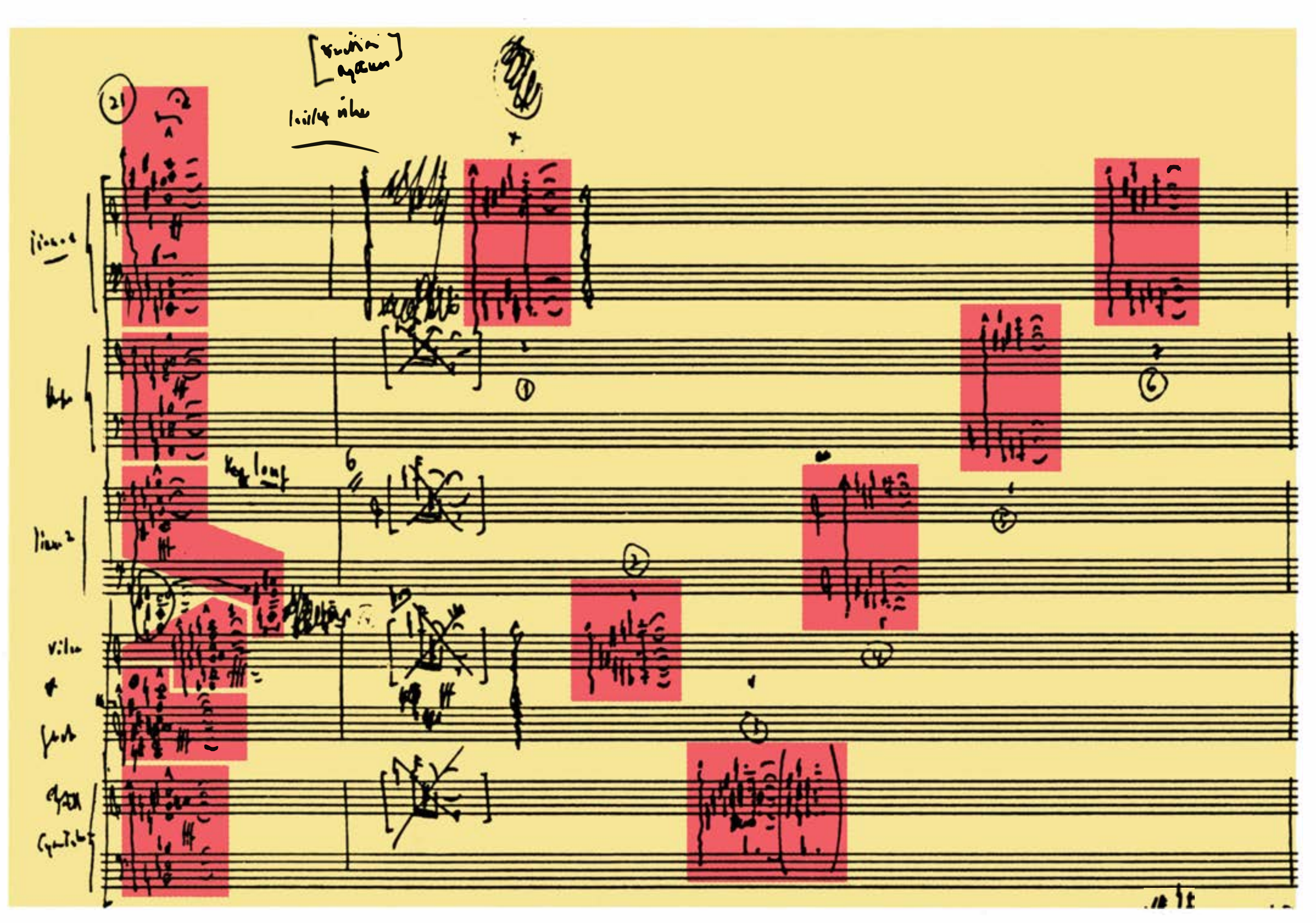
Répons es un término medieval francés para designar un determinado tipo de música coral antifonal: una forma compositiva en donde el canto del solista siempre es contestado por el canto del coro. El término es adecuado para la composición contemporánea ya que explora preguntas y respuestas en niveles musicales diferentes. En *Répons* se pueden encontrar todo tipo de diálogos: entre los solistas y el conjunto, entre un solista y el resto y entre pasajes transformados y sin transformar. Casi todos los restantes aspectos de la música se hallan también incluidos en este juego de preguntas y respuestas: altura (las frecuencias percibidas de un tono), ritmo (la pauta o esquema temporal de las pulsaciones), dinámica (la intensidad de un tono) y timbre (la calidad tonal característica del sonido de cada instrumento). Las transformaciones en tiempo real del sonido de los solos instrumentales son necesarias para recrear muchas de estas oposiciones. (Con el fin de hacer posibles estas transformaciones, todos los instrumentos solistas están provistos de micrófonos. De esta manera, las señales eléctricas equivalentes de sus sonidos se hallan instantáneamente disponibles para su procesamiento digital y su remisión consiguiente a los altavoces.)

La forma antifonal tradicional de la composición sugiere otras dos ideas que se incorporaron en *Répons*. La primera es la noción de desplazamiento de la música en el espacio, pues el solista y el coro se hallan en posiciones físicas distintas. Basándose en este concepto, los seis solistas que participan en una interpretación típica de *Répons* se hallan situados en la periferia de la sala de conciertos (así como los seis altavoces), mientras que el conjunto instrumental se aloja en el centro (con la audiencia rodeándolo).

El desplazamiento puede considerarse, en términos generales, una traslación a lo largo de cualquier dimensión. Si se toma la frecuencia como una dimensión que caracteriza los sonidos musicales, entonces un desplazamiento quedaría representado por una varia-



4. PROGRAMA DE ESPACIALIZACION del 4X. Toma el sonido, captado por los micrófonos, y lo dirige a un módulo o subprograma seguidor de envolvente para generar una señal temporal (*color*) cuya frecuencia (indicada por la intensidad del color) varía al compás de los cambios en amplitud de la envolvente de la forma de la onda sonora. La señal temporal sirve a su vez de entrada para otros cuatro módulos basculantes o "flip-flop" (FFU), que controlan el nivel de emisión de sonido en cada altavoz. La señal pasa de un FFU al siguiente conforme un altavoz se desconecta y se conecta el siguiente. (Sólo hay conectado un FFU en cada momento.) La frecuencia de la señal determina cuánto tiempo permanece conectado un FFU; cuanto mayor sea la frecuencia, antes se desconecta el FFU. En este gráfico, la frecuencia de la señal de control en el tiempo correspondiente al primer punto en la envolvente dicta cuánto tiempo estará funcionando el primer FFU, la frecuencia correspondiente al segundo punto en la envolvente indica cuánto tiempo estará conectado el segundo FFU, y así sucesivamente. Enlazando los FFU en un circuito cerrado, el sonido puede circular repetidas veces de altavoz en altavoz a una velocidad que depende de su amplitud. El nivel de un sonido requiere cierto tiempo para llegar a su máximo y para volver a cero; de ahí que exista solapamiento entre los altavoces.



5. FRAGMENTO DE LA PARTITURA ORIGINAL de *Répons*, donde se muestran los acordes (*marcados en color rojo*) de los cuales los intérpretes obtienen los arpegios, tocando cada nota de forma secuencial de abajo arriba. Los solistas tocan el primer conjunto de arpegios a la vez y, por separado, el segundo.

ción en frecuencia —a semejanza del habitual recurso musical de transportar una melodía a distintas escalas. Siguiendo el mismo patrón, un desplazamiento en el tiempo representa un retraso, pues comporta trasladar las notas hacia el futuro.

Otra idea que sugiere la música antifonal tiene que ver con su estructura: la respuesta a una voz (el solista) por varias (el coro). Esa situación evoca la noción de multiplicación y proliferación de sonidos, que puede plasmarse por medio de técnicas de procesamiento informático; partiendo de una sola nota o un acorde se crea una multitud de notas o acordes relacionados con el original.

Répons se inicia con un movimiento de siete minutos a cargo del grupo instrumental; la tensión musical asciende lentamente para dar entrada a los solistas, cuyos instrumentos son el címbalom (un instrumento de cuerdas que se percuten manualmente con unas baquetas afelpadas), un xilófono, un glockenspiel, un vibráfono (un instrumento parecido al xilófono), un arpa, un sintetizador de teclado Yamaha DX 7 y un par de pianos. (Hay seis solistas para ocho instrumentos: un solista toca el xilófono y el glockenspiel y otro toca el piano y el sintetizador.) Al final de la introducción, los solistas protagonizan una entrada brusca. Cada solista toca al unísono con los otros un arpegio breve y diferente: un acorde cuyas notas componentes se emiten en secuencia, desde la más grave hasta la más aguda. La resonancia de los arpegios se mantiene en la sala durante unos ocho segundos, hasta que el sonido acaba por extinguirse. Durante esta eclosión, el 4X y la Matrix 32 han entrado en acción: toman los sonidos de los acordes que los solistas han arrancado, nota a nota, de sus instrumentos, y los desplazan de altavoz en altavoz.

A causa de ello, la atención del público muda repentinamente del centro de la sala a la periferia, donde se hallan los solistas y los altavoces. El público percibe que los sonidos de los solistas dan vueltas por la sala, sin poder discernir los caminos seguidos por los distintos sonidos. El efecto general pone de relieve la relación antifonal entre el grupo central y los solistas, haciendo sentir al público las dimensiones espaciales que separan, al conjunto, de los solistas y a éstos entre sí. Podríamos decir que con esta maniobra se ha "espacializado" el sonido.

El sonido de cada solista no se pasea a una velocidad fija de altavoz en altavoz; la velocidad depende directamente de la intensidad del sonido, que en un momento dado es proporcional a la amplitud de la envolvente —el contorno— de la forma de la onda sonora. Cuanto mayor sea la amplitud con más rapidez parecerá que se mueve. Si bien los instrumentos de los solistas producen envolventes de formas semejantes (presentando un ascenso inicial muy pronunciado seguido de una caída que disminuye exponencialmente), el tiempo que tarda en extinguirse una envolvente depende de la altura de las notas, así como del instrumento que las produce. En este sentido, las notas agudas de un piano tienen un ataque más rápido y un tiempo de extinción más corto que el de las notas graves, y una nota tocada en un glockenspiel posee un ataque más pronunciado y un tiempo de

extinción más corto que la misma nota tocada en un piano.

Dado que los sonidos de los instrumentos que tocan los solistas se extinguen a distintas velocidades, los propios sonidos reducen su velocidad de manera desigual. La impresión general para el oyente es el de un ataque único y espectacular que se ramifica poco a poco en varios elementos. Además, conforme disminuye la amplitud general la impresión original de los sonidos que se mueven con rapidez alrededor de la sala es reemplazada por una sensación de inmovilidad.

La espacialización en función de la amplitud se logra aumentando al máximo el nivel del sonido de un instrumento solista en un altavoz, a la vez que se elimina el nivel de sonido del instrumento en otro altavoz. Unos módulos basculantes ("flip-flop") controlan en el 4X el aumento y la disminución simultáneos de los niveles de sonido; establecen también el tiempo durante el cual se mantiene el nivel máximo en un determinado altavoz [*véase la figura 4*]. Como el sonido de cada solista circula con un orden determinado por cuatro altavoces, las unidades basculantes ("flip-flop") están ordenadas en bucles que contienen cuatro unidades. Un módulo basculante funciona de acuerdo con una señal temporal cuya frecuencia varía en proporción a los cambios de amplitud en la envolvente de la onda sonora, que se controla sin cesar mediante un módulo "seguidor de envolventes". El resultado es que las caídas de amplitud en la envolvente (como sucede en la fase de extinción del sonido) reducen la frecuencia de la señal temporal y con ello el módulo basculante mantiene durante más tiempo el nivel máximo de sonido en un altavoz antes que el siguiente módulo "flip-flop" desplace el sonido al siguiente altavoz.

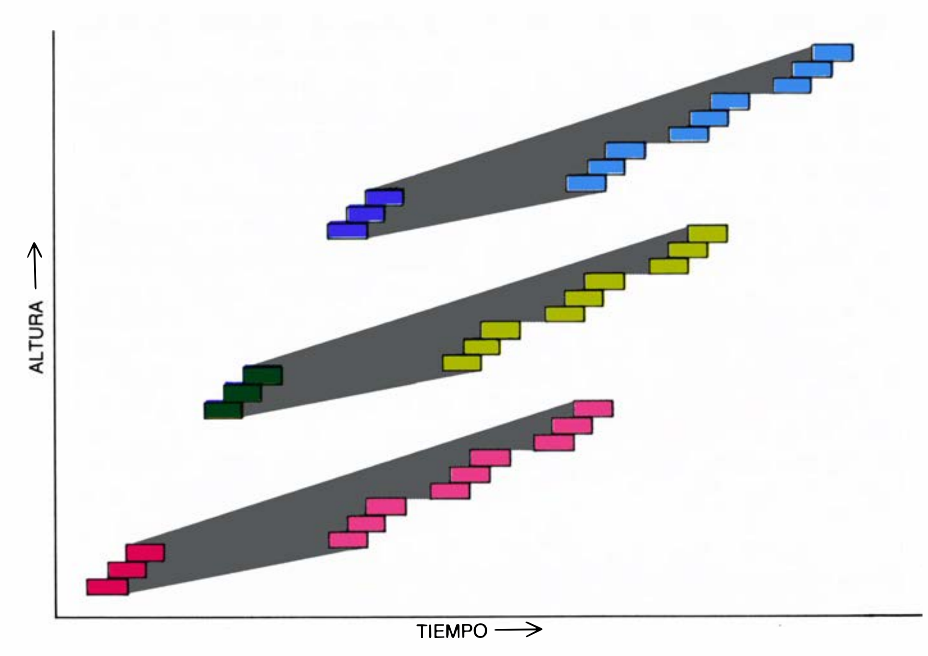
En cuanto los sonidos de los arpegios espacializados se han extinguido lo suficiente, el director de orquesta da la entrada, a intervalos más o menos iguales, a cada solista para que toque otro acorde arpegiado, respondiendo a los arpegios simultáneos con arpegios distanciados. Cinco de los acordes arpegiados se envían al 4X, que registra continuamente o almacena los sonidos y los incluye en su catálogo de ondas memorizadas. Inmediatamente después de almacenarlas, el 4X recupera sin interrupción las informaciones de sonido mediante 14 módulos de "lectura", de forma que se obtienen 14 copias exactas del sonido original; cada una, sin embargo, con distinto retraso en el tiempo. A continuación otro módulo del 4X desplaza la frecuencia de cada copia y la reproduce.

El ejemplo que acabamos de describir es esencialmente un arpegio (extender 14 copias en el tiempo y en frecuencia) de un arpegio (la secuencia de notas contenida en un acorde) de un arpegio (los solistas que van entrando sucesivamente). Por medio del retraso y el desplazamiento en frecuencia, la idea de un arpegio —desplazamiento de entidades musicales en tiempo y altura— se ha transferido, de una manera eficaz, de la composición instrumental a la electrónica.

Bajo el desplazamiento de alturas que aparece en *Répons* subyace otra pauta, con independencia de que se especifique en la composición instrumental o en la composición electrónica. Buena parte de los compases de esta pieza puede tomarse como una serie de variaciones sobre acordes basados en el desplazamiento de notas en altura con diferentes intervalos. Sin entrar en detalles, podemos afirmar que gran parte del material armónico de *Répons* puede derivarse de cinco acordes, que se escuchan ya en el primer compás de la pieza.

De hecho, los seis acordes arpegiados que interpretan simultáneamente los solistas cuando hacen su entrada, así como los que tocan luego de forma separada, derivan todos ellos del mismo acorde fundamental. Los acordes de la entrada de los solistas están construidos transponiendo el acorde básico un semitono hacia arriba y un semitono hacia abajo y juntando de manera diversa partes de los dos acordes resultantes. (Un semitono es la unidad mínima de transposición posible en la música tradicional occidental. Transponiendo un acorde en doce semitonos resulta el mismo acorde, aunque una octava más aguda o más grave.) Los acordes derivados son desplazados también una octava hacia arriba o hacia abajo, siendo entonces interpretados por cada uno de los instrumentos solistas en diferentes octavas.

Por otro lado, los arpegios tocados por separado se obtienen transponiendo el acorde fundamental hacia arriba el mismo número de semitonos que los que hay entre la nota más aguda del acorde y cada una de las demás notas que lo forman. Para acabar, las notas de los acordes resultantes se ajustan aumentando o sustrayendo una octava de la escala para que queden entre la nota más grave y la más aguda del acorde fundamental. A grandes rasgos, el procedimiento consiste en "rotar" el acorde recuperando las notas que re-



6. ARPEGIO DE UN ARPEGIO DE UN ARPEGIO, similar al que se observa en *Répons*. Lo representamos de forma esquemática en un gráfico cuyas coordenadas son tiempo y altura. Un arpegio se puede considerar, de forma muy general, como el desplazamiento en el tiempo y en la frecuencia de cualquier conjunto de entidades musicales (no sólo las notas de un acorde). Tres acordes arpegiados de tres notas (*cajetines de color oscuro*) tocados por músicos en distintos momentos y a distintos niveles de altura pueden considerarse en sí mismos un arpegio. La distribución en tiempo y en frecuencia de tres copias generadas por ordenador (*cajetines de color claro*) de acorde arpegiado corresponden también a un arpegio. En *Répons* cinco solistas tocan acordes arpegiados de 7 notas que se copian y se desplazan en frecuencia y se reproducen 14 veces.

basan los límites de altura para incluirlas dentro del acorde.

Los desplazamientos en frecuencia de las 14 copias de los arpegios interpretados por separado siguen también el mismo modelo general de desplazamiento en altura. Cada acorde inicial se transforma de suerte tal que las alturas de sus notas siguen siendo las mismas, aunque en distinta octava. El desplazamiento en frecuencia refuerza el acorde original y le da, al mismo tiempo, una nueva calidad armónica. En resumen, se desplaza cada acorde fundamental para crear un nuevo juego de acordes que, a su vez, son desplazados en frecuencia por el 4X, de modo que el resultado final puede considerarse una transposición de una transposición. La idea básica que correlaciona la escritura instrumental con la escritura para el ordenador es el desplazamiento según la dimensión frecuencia.

La transposición que efectúa un módulo de desplazamiento de frecuencia del 4X no es, sin embargo, completamente equivalente a la transposición ordinaria de acordes. El módulo no preserva las relaciones tonales entre los parciales o componentes de frecuencia del tono. En general, cada tono tiene un parcial que define su altura, denominado frecuencia fundamental, así como cierto número de parciales que suelen ser múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Las proporciones entre las frecuencias de los parciales de un tono, igual que las amplitudes relativas de los parciales, que varían mientras se está tocando un tono, determinan el timbre del tono. Por tanto, si se desplaza cada parcial de un tono cierto valor fijo, las proporciones entre parciales se alteran y así se modifica también el timbre del sonido original. Este problema podría resolverse si se consiguiera desplazar la frecuencia de cada parcial independientemente en un valor arbitrario. Ni que decir tiene que, para lograr esto, se requiere el dominio de técnicas de análisis en tiempo real y de control mucho más potentes. Tal es el campo donde estamos ahora trabajando en el IRCAM.

Si bien el ordenador es, hasta cierto punto, un advenedizo en la música, su presencia ha abierto nuevas perspectivas que permiten a compositores y técnicos de sonido explorar nuevas ideas o nuevas yuxtaposiciones de viejas ideas. Su introducción práctica exige equipos potentes que admitan diversas formas de programación. Ningún compositor o técnico de sonido puede estar satisfecho con un equipo abierto sólo al estudio de un método de análisis, síntesis o transformación de sonidos.

Demos un ejemplo. Las manipulaciones electrónicas que se utilizan en los dos breves pasajes de *Répons* que hemos descrito se acometieron con una sola interconexión 4X, en la que estaban programados seis módulos para la espacialización, cinco para retardos múltiples, 30 para el desplazamiento de frecuencia y diferentes módulos de reducción de ruido para cada solista. Sin embargo, entre los dos pasajes apenas cubren 30 segundos de una obra que casi dura 45 minutos, durante la cual hay otras 50 interconexiones que se han de cargar en serie. Queda patente la necesidad de máquinas muy flexibles para ejecutar piezas de medios mixtos en concierto, tal como *Répons*.

Desgraciadamente, la tendencia actual apunta hacia la fabricación de aparatos especializados, cada uno de los cuales incorpora su propio método de proceso de señales digitales. Esto obedece, en parte, a las limitaciones comerciales, que exigen unas unidades baratas. Pero si se desea conectar varias unidades electrónicas surgen de inmediato problemas de control y coordinación. Por otro lado, sólo puede aplicarse, en un momento dado, una fracción de la potencia total de cálculo. Además de infrautilizar el sistema, la disposición impide poner en práctica la potencia combinada total de cálculo en un método para procesar señales digitales. El objetivo del IRCAM es ayudar a compositores, técnicos de sonido e ingenieros eléctricos para que resuelvan estos problemas sin perder de vista la música.

7. TRANSPOSICIONES de cinco acordes básicos (*pentagrama gris*). Constituyen gran parte del bagaje armónico de *Répons*. Los acordes tocados por los solistas cuando entran todos derivan de un acorde fundamental (*en recuadro*). El acorde del recuadro es el mismo que toca el vibráfono. Si se desplaza el acorde dos octavas y un semitono hacia arriba y dos octavas y un semitono hacia abajo, se obtienen los acordes que tocan el glockenspiel y el segundo piano. Los acordes para los otros dos solistas se construyen combinando las secciones superior e inferior de los tres acordes y desplazando las alturas una octava hacia arriba o hacia abajo: las notas de cada acorde se hallarán dentro de un intervalo de dos octavas y un semitono.

Los lectores interesados pueden obtener una cinta que contiene fragmentos de varias composiciones de música en la que interviene el ordenador, incluyendo *Répons*, remitiendo US$ 9, a Public Relations, IRCAM, 31 rue Saint-Merri, 75004 París, France.

Lo propio, lo ajeno y la autoinmunidad

La autoinmunidad –el reconocimiento y ataque de tejidos propios por el sistema inmunitario– no es tan sencilla como se creía. El autorreconocimiento parece constituir el núcleo de la salud y subyace a ciertas enfermedades

Irun R. Cohen

Suele considerarse que la tarea principal del sistema inmunitario consiste en distinguir entre lo que es "propio" y lo que es "ajeno". Una vez hecha esa distinción, lo propio se conserva y lo ajeno se destruye. Por supuesto, en el nivel máximo de generalización ello es así y los seres humanos permanecen vivos y sanos precisamente porque tal ocurre. Sin embargo, según se ha visto recientemente con claridad, en un nivel de detalle más fino la distinción entre lo propio y extraño no es absoluta. Una de las vías que han abierto camino a esos hallazgos son los trastornos autoinmunitarios, en los que el sistema inmunitario ataca tejidos normales, sanos. La enfermedad autoinmunitaria, que puede resultar incapacitante o fatal, afecta a cualquier tejido u órgano. Sus víctimas se encuentran a menudo en la primera parte de la vida y, por razones que se desconocen, es más frecuente entre las mujeres que entre los hombres.

El trabajo realizado en mi laboratorio sobre una forma de artritis autoinmunitaria señala que la base de la autoinmunidad podría encontrarse en el parecido entre una molécula extraña específica y una molécula del propio organismo. Es más, nuestro trabajo resulta coherente con un modelo de sistema inmunitario en el que los receptores que realizan el trabajo de reconocimiento pueden, a su vez, ser reconocidos por otros receptores. Tal "reconocimiento de lo propio" –que se descartaba estrictamente en otros modelos del sistema inmunitario– puede constituir la base de un entramado cuyo equilibrio mantiene el cuerpo saludable. Cuando el equilibrio se rompe, como ocurre en la autoinmunidad, aparece la enfermedad. Esta nueva imagen, en la que lo propio y lo ajeno ya no son absolutamente distintos, ha comenzado a rendir beneficios prácticos en forma de vacunas que, en último término, podrían paliar los graves sufrimientos causados por las enfermedades autoinmunitarias.

La relación de enfermedades autoinmunitarias es larga y preocupante. Se encuentran en ella la esclerosis múltiple, en la que el tejido atacado es la mielina (sustancia que forma una vaina en torno a los nervios del sistema nervioso central); la miastenia grave, en la que la diana es una molécula que actúa de receptor del importante neurotransmisor acetilcolina; la artritis reumatoide, cuyo objetivo son las articulaciones periféricas; la diabetes mellitus de tipo I (juvenil), en la que se destruyen las células que producen la insulina, y el lupus eritematoso sistémico, en el que el ataque se produce contra el ADN, los vasos sanguíneos, la piel y los riñones. Al contrario que en el SIDA, caracterizado por una inactivación de células clave del sistema inmunitario, en todas esas otras enfermedades la respuesta inmunológica es fuerte y está bien organizada; sin embargo, se dirige contra algún componente esencial del organismo. El propio sistema inmunitario es el criminal. ¿Cómo explicar ese error?

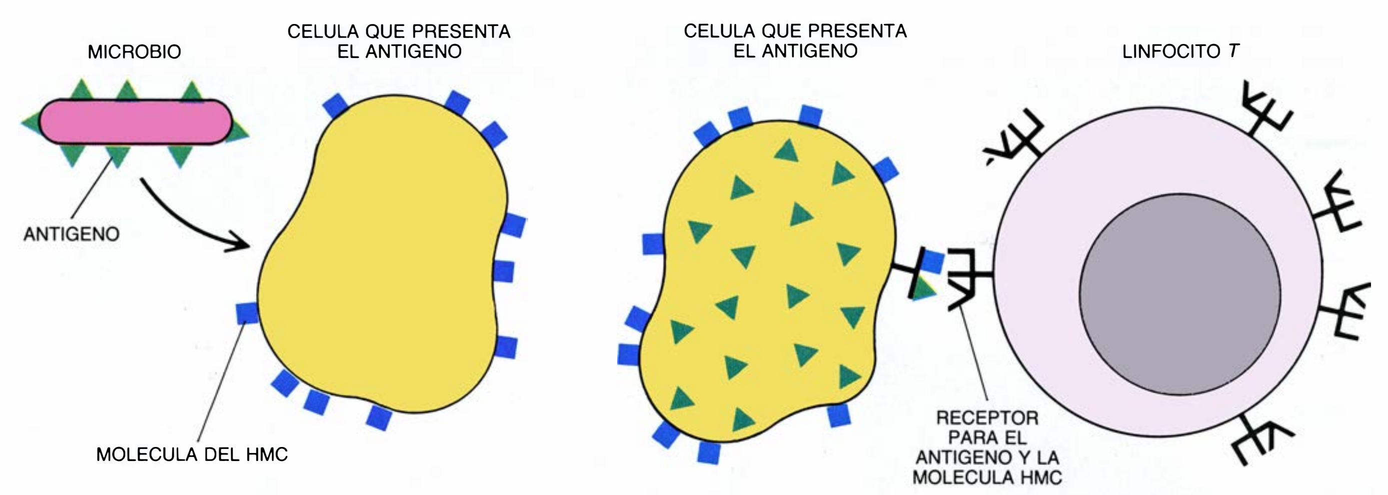
La respuesta reside claramente en el problema del reconocimiento, cuestión que, a su vez, lleva a las células que median el reconocimiento en el sistema inmunitario: los linfocitos. En el sistema inmunitario se distinguen dos clases de esas células: linfocitos *T* y linfocitos *B*. Ambos derivan de células madre de la médula ósea. Sin embargo, las células madre carecen de los receptores que permitan a las células *B* y *T* reconocer moléculas específicas como dianas del ataque inmunitario. Los receptores van apareciendo a medida que maduran las células madre pluripotenciales. Fruto del proceso de maduración, cada célula *B* o *T* portará sobre su superficie varias copias de un receptor inmunitario, que le permiten reconocer una sola molécula. Cualquier molécula susceptible de ser reconocida de ese modo se denomina antígeno.

Una de las características más notables del proceso de reconocimiento es que no requiere el antígeno entero, sino que basta un pequeño fragmento, el epitopo. Si (como ocurre con frecuencia) la molécula que ha de reconocerse es un polímero, así una proteína o una cadena de azúcares, el epitopo suele ser un pequeño grupo de cuatro a seis monómeros de los miles que la forman (aminoácidos en las proteínas, monosacáridos en las cadenas azucaradas). La forma y la carga eléctrica de cada epitopo determinan que éste se acople mejor a un receptor particular. Cuando un epitopo encuentra su receptor complementario, ambos forman una asociación reversible que genera una señal en la célula *T* o *B*.

En el centro de este proceso está el hecho siguiente: cada linfocito lleva sobre sí receptores, pero de especificidad única. Sin embargo, para que el sistema inmunitario sea capaz de reconocer una amplia gama de patógenos, debe existir una gran diversidad de receptores; en efecto, de manera constante se generan al azar nuevos receptores, mediante un proceso de recombinación genética que tiene lugar en las células madre progenitoras. No todos los receptores que se crean son igualmente aprovechables; el sistema inmunitario aparta los innecesarios mediante el proceso de selección clonal. El linfocito cuyo receptor se acople mejor a un epitopo situado en un antígeno microbiano disfrutará de cierta ventaja sobre sus competidores: se replicará más de-



1. LINFOCITO *T*, un glóbulo blanco que constituye parte esencial del sistema inmunitario, ampliado aquí 30.000 diámetros. Esas protuberancias de la superficie (*villi*) están causadas por el arrugamiento de la membrana externa de la célula; incrementan el área de la superficie de la membrana disponible para las transacciones con el medio ambiente. La estructura en forma de tallo que se proyecta del cuerpo celular (el uropodo) interviene, según parece, en la movilidad de la célula. El ejemplar que recoge la micrografía es un linfocito *T*4 de tipo ''coadyuvante'' (*helper*); facilita la acción de otras células del sistema inmunitario. Al reconocer y atacar el cartílago de la articulación, las células *T*4 causan una enfermedad autoinmunitaria experimental: la artritis adyuvante.



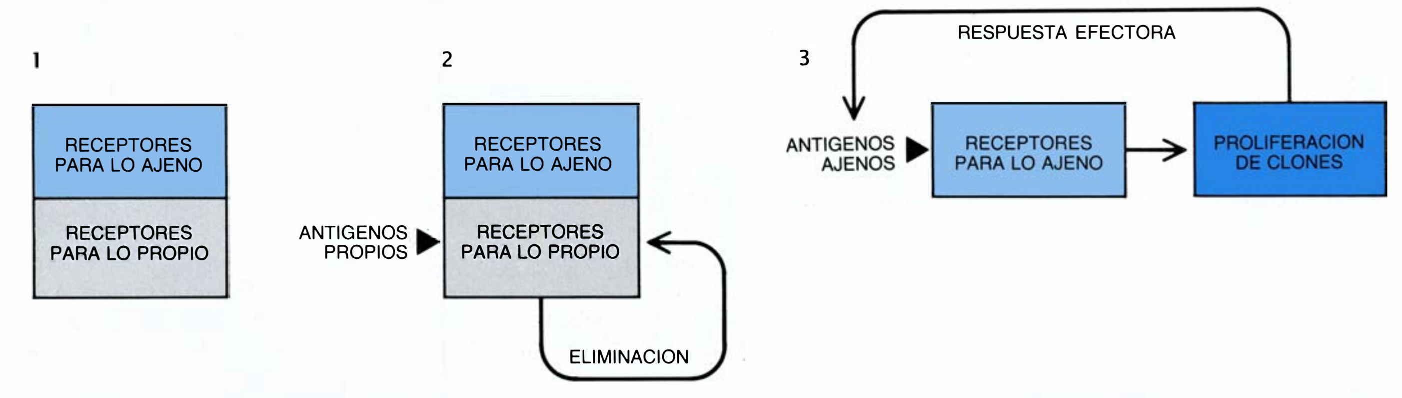
2. RECONOCIMIENTO DEL ANTIGENO, presentado por una célula especializada, por parte de la célula *T*. Antígeno es cualquier molécula que sea reconocida por un receptor situado sobre un linfocito o por un anticuerpo. Cuando la célula que presenta el antígeno encuentra un microorganismo, digiere al invasor y ofrece a la célula *T* sus componentes, junto con moléculas del complejo mayor de histocompatibilidad, o MHC, que pertenecen a la propia célula que presenta el antígeno. El subsiguiente acoplamiento del antígeno y de las moléculas del MHC con el receptor de la célula *T* insta la respuesta del linfocito.

prisa y poco después predominará entre las células *T* y *B* de su entorno.

Los descendientes de un progenitor forman un clon que, además de aumentar de tamaño, adquieren configuraciones especializadas. Las células *B* pueden convertirse en células plasmáticas, que secretan anticuerpos (moléculas con la misma forma que el receptor del antígeno del clon) o en células de memoria, que identifican el epitopo con más eficacia si se produce una aparición posterior del patógeno. Al madurar, las células *T* se adscriben a un grupo que lleva el marcador de superficie conocido como *T*4, o bien a otro grupo que lleva el marcador *T*8. En esos dos grupos existen células que actúan directamente ("efectoras") y otras que actúan influyendo sobre otras células del sistema inmunitario ("reguladoras"). Las efectoras *T*8 son citotóxicas: matan a las células que portan un antígeno específico. Las reguladoras *T*8 son supresoras: inhiben la actividad de otras células *T* o *B*. Las efectoras *T*4 dañan los tejidos, activando otros glóbulos blancos; las células *T*4 reguladoras son "coadyuvantes" (*helpers*) y facilitan la acción tanto de células *B* como de células *T*.

Por consiguiente, la generación al azar de nuevos receptores y su separación por selección clonal confieren gran flexibilidad al sistema inmunitario. El número de posibles estructuras receptoras es enorme: tal vez sean millones los clones diferentes de linfocitos *T* y centenares de millones los de linfocitos *B*. A partir de los receptores generados estocásticamente que se producen sin pausa, la selección clonal reduce la variedad a unos pocos tipos predominantes para cada antígeno. Desde el punto de vista teórico, cabe considerar la selección clonal una forma de procesamiento digital en el que el sistema es capaz de centrar su atención en la información más relevante (en el receptor que mejor se ajusta a un epitopo) y despreciar el resto (todos o casi todos los pares receptor-epitopo que compiten con el anterior).

Sin embargo, esa misma flexibilidad es el origen del problema: el reconocimiento de lo propio. Si el sistema inmunitario es capaz de reconocer casi todo, ¿por qué no a sus propias moléculas? F. MacFarlane Burnet, de la Universidad de Melbourne, autor de la teoría de la selección clonal, propuso una solución al problema del reconocimiento de lo propio (autorreconocimiento). Durante el desarrollo prenatal, argumentaba Burnet, todos los antígenos presentes serían propios (autoantígenos). Si el reconocimiento de un epitopo durante la gestación desencadenara un suicidio clonal, el sistema inmunitario quedaría purgado de todos los clones capaces de reconocerse a sí



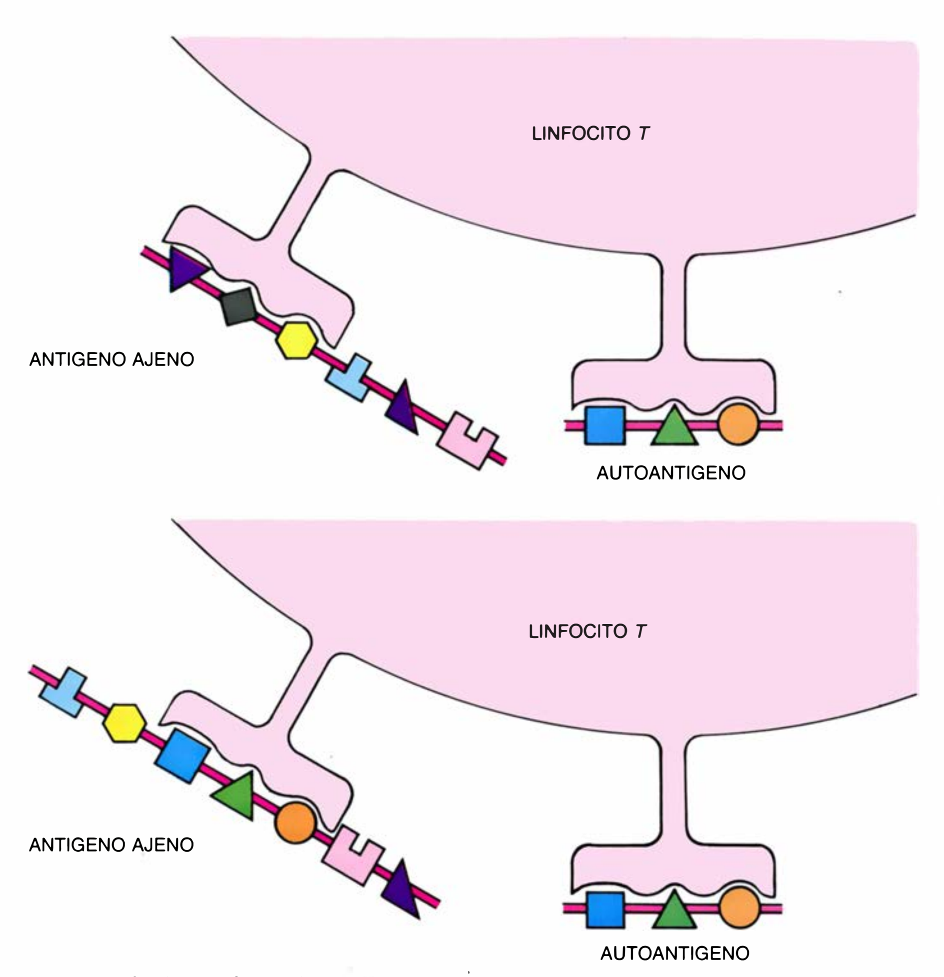
3. SUICIDIO CLONAL, teoría desarrollada para explicar la ausencia de enfermedades autoinmunitarias en la mayoría de las personas. Un clon es un grupo de células que descienden de un mismo progenitor y que, por esa razón, son genéticamente idénticas. El sistema inmunitario puede crear clones capaces de reconocer antígenos propios y foráneos (*1*). En el suicidio clonal, que se registra antes del nacimiento, se eliminan todos los clones que poseen receptores para antígenos propios (*2*), mientras que persisten en el organismo los clones que reconocen antígenos ajenos. Al toparse con el antígeno correspondiente, proliferan y se especializan para combatir el invasor (*3*). La teoría inmunológica del suicidio clonal fue formulada en los años 1950 por F. MacFarlane Burnet, de la Universidad de Melbourne. Recientemente se ha comprobado que no basta un mecanismo tan sencillo para distinguir los antígenos propios de los extraños.

mismos. El reconocimiento de epitopos después del nacimiento induciría la actividad inmunitaria; mas, para entonces, el sistema inmunitario sería ciego a las estructuras propias. Burnet explicó la aparición de la enfermedad autoinmunitaria como una exposición, después del nacimiento, a antígenos propios que habían quedado accidentalmente secuestrados durante la gestación.

Sin embargo, para ser fiable, la eliminación clonal requiere una distinción absoluta entre lo propio y lo que no lo es: deben eliminarse los receptores que reconocen lo propio y conservarse los demás. Sin embargo, parece claro que no resulta fácil realizar tan absoluta distinción. Una razón de ello es que, aunque suele imaginarse la relación receptor-antígeno asimilándola a la que guardan entre sí una cerradura y su llave, en realidad el acoplamiento no es exacto ni exclusivo. Dentro de ciertos límites, un mismo receptor puede combinarse con muchos epitopos diferentes y ajustarse a cada uno de ellos con mayor o menor precisión. La capacidad de millones de receptores diferentes para unirse a muchos epitopos multiplica el repertorio funcional, de tal manera que resulta difícil imaginar que una molécula biológica cualquiera, incluidas aquí también las moléculas del propio organismo, pueda quedar sin que la reconozca al menos un receptor.

El desafío estriba en que lo propio y lo invasor están formados por los mismos sillares, o bloques estructurales: proteínas, carbohidratos, ácidos nucleicos y lípidos. Más aún, la evolución tiende a conservar la constitución de las moléculas que, como las enzimas o las hormonas, realizan funciones biológicas clave, de suerte que lo propio y lo ajeno quizá tengan moléculas idénticas o muy parecidas. Finalmente, parece que, para camuflarse, algunos agentes patógenos fabrican antígenos que remedan los del hospedador. Por ejemplo, parásitos del tipo de las leishmanias (algunos de los cuales causan la tripanosomiasis) sintetizan antígenos semejantes a los de los glóbulos rojos de sus hospedadores mamíferos. Según parece, ese "mimetismo" antigénico constituye una característica persistente de la lucha entre lo que es propio y el patógeno.

Para entender el papel que desempeña el mimetismo antigénico en la autoinmunidad, mis colegas y yo estudiamos la artritis adyuvante de las ratas, una enfermedad experimental observada por primera vez en la década de



4. MIMETISMO ANTIGENICO, basado en el parecido que pueden guardar entre sí un antígeno propio y otro foráneo. A menudo los antígenos son polímeros, como proteínas o cadenas de azúcares. Tras el acoplamiento del receptor con un linfocito o un anticuerpo, cuyo ajuste es comparable al de una llave con su cerradura, se encuentra la secuencia de unidades monoméricas. Cuando un antígeno propio se parece a otro ajeno, quizás encajen en el mismo receptor. La semejanza puede responder a que coincidan monómeros de formas parecidas (*arriba*) o a que los polímeros presenten la misma secuencia de subunidades (*abajo*).

1950 por Carl M. Pearson, de la Universidad de California en Los Angeles. Pearson observó que las ratas a las que se les inoculaba una mezcla de aceite mineral (parafina líquida) y organismos muertos de *Mycobacterium tuberculosis* (el agente de la tuberculosis) desarrollaban una artritis. La artritis adyuvante provocaba la degeneración del cartílago de las articulaciones y Pearson y otros advirtieron que sus síntomas se parecían mucho a los de la artritis reumatoide, afección que se caracteriza por la inflamación progresiva de las manos y los pies. A diferencia de la osteoartritis (que con frecuencia acompaña al envejecimiento), la artritis reumatoide ataca de manera peculiar a las mujeres jóvenes y puede producir en ellas una trágica deformación.

Se admitía que las causas de la artritis reumatoide y de la adyuvante eran de índole autoinmunitaria, de ahí que mis colaboradores y yo esperásemos que la explicación del trastorno producido en las ratas nos ayudara a comprender la enfermedad humana. La lesión de los tejidos que se advertía en la artritis adyuvante era más propia de los linfocitos *T* que de los *B* o de otros componentes inmunitarios; por consiguiente, nuestra estrategia consistió en aislar los clones de células *T* que estaban atacando el cartílago de las articulaciones de las ratas. Parece una estrategia sencilla, pero exigió la aplicación de varios avances técnicos importantes, la mayoría de ellos fruto de los trabajos pioneros de Avraham Ben-Nun, a la sazón uno de mis alumnos de licenciatura.

El trabajo de Ben-Nun se basaba en otra alteración autoinmunitaria inducida, la encefalomielitis autoinmunitaria experimental (EAE), mucho mejor conocida que la artritis adyuvante. Podía inducirse en animales de laboratorio mediante la inoculación de una proteína básica, un componente de la mielina del sistema nervioso central. La actividad inmunitaria contra la proteína

básica se manifiesta a través de una parálisis (con frecuencia fatal) e inflamación de la región del cerebro y de la médula espinal, donde las fibras nerviosas están recubiertas de una vaina de mielina. Algunos investigadores consideran que la EAE constituye el mejor modelo de laboratorio de la esclerosis múltiple; por esa razón, se ha realizado un importante esfuerzo con el propósito de caracterizar los epitopos de la proteína básica responsables de la EAE de ratas, cobayas, ratones y otros animales de experimentación.

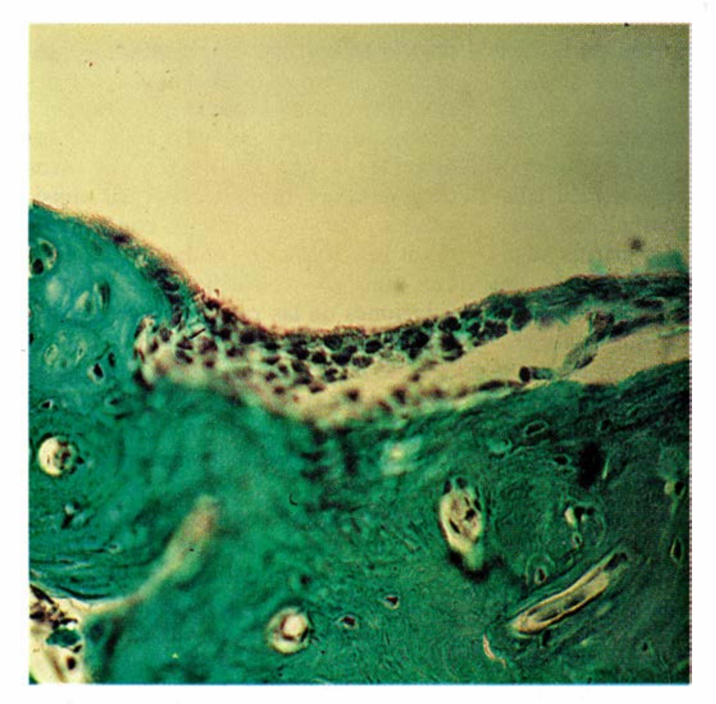
Como en el caso de la artritis ayuvante, se creía que la EAE estaba causada por células *T*, no por células *B* o anticuerpos. Nuestra estrategia consistió, por consiguiente, en aislar clones de células *T* que respondiesen específicamente a la proteína básica. Ben-Nun puso a punto un método de desarrollo de esos clones. Se cultivaron, en un medio que contenía el antígeno de la proteína básica, células *T* procedentes de ratas inmunizadas frente a aquella proteína. Las células que la reconocían empezaron siendo una pequeña minoría, pero la presencia del antígeno estimuló su proliferación a expensas de otros linfocitos: se trataba de una selección clonal en cultivo de tejido. El procedimiento (en este trabajo Ben-Nun y yo colaboramos con Hartmut Wekerle, del Instituto Max Planck de Inmunología) nos permitió obtener clones puros de células *T* que reaccionaban a la proteína básica; todos los clones aislados hasta el momento eran del tipo *T*4.

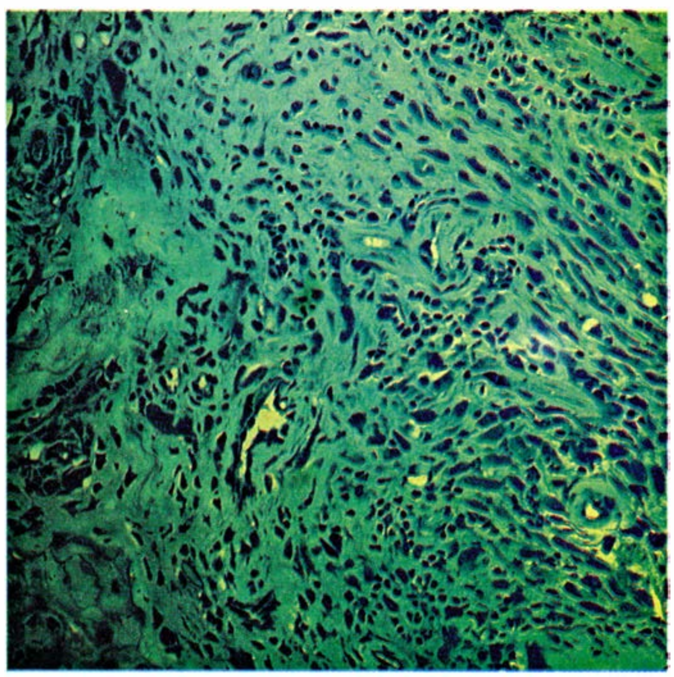
En trabajos posteriores se comprobó de manera inequívoca que esas células *T*4 causaban la EAE. Yaakov Naparstek demostró que se acumulaban en el cerebro y en la médula espinal justo antes de producirse la parálisis. Además, logramos aislar, de ratas inmunizadas, células *T* anti-proteína básica que, al inyectarlas en otras ratas, les provocaban EAE. Se mostraba así por primera vez sin objeción posible que un clon específico de células *T* era responsable de una alteración autoinmunitaria conocida. Paradójicamente, aunque las células *T* procedentes de ratas inmunizadas eran capaces de causar la enfermedad, en algunos casos, las ratas de las que se habían obtenido ya se habían recuperado de su grave parálisis y no mostraban signos clínicos del mal. Tan sorprendente hallazgo apuntaba la existencia de mecanismos que mantienen la autoinmunidad bajo control, tema sobre el que volveremos luego.

Poco después de la realización de esos experimentos, Joseph Holoshitz, que se encontraba temporalmente en mi laboratorio, sugirió que aplicásemos a la artritis adyuvante los ensayos que habíamos hecho con la EAE. Parecía una buena idea. El escollo residía en que, en la EAE, el antígeno que causaba la alteración —la proteína básica— se conocía suficientemente para empezar a trabajar con él, mientras que, en el caso de la artritis adyuvante, se ignoraba cuál era el antígeno pertinente. Se admitió que tenía que encontrarse en *Mycobacterium tuberculosis*, pero la cifra de antígenos del germen era de varios millares. ¿Cómo encontrar esa aguja en el pajar inmunológico?

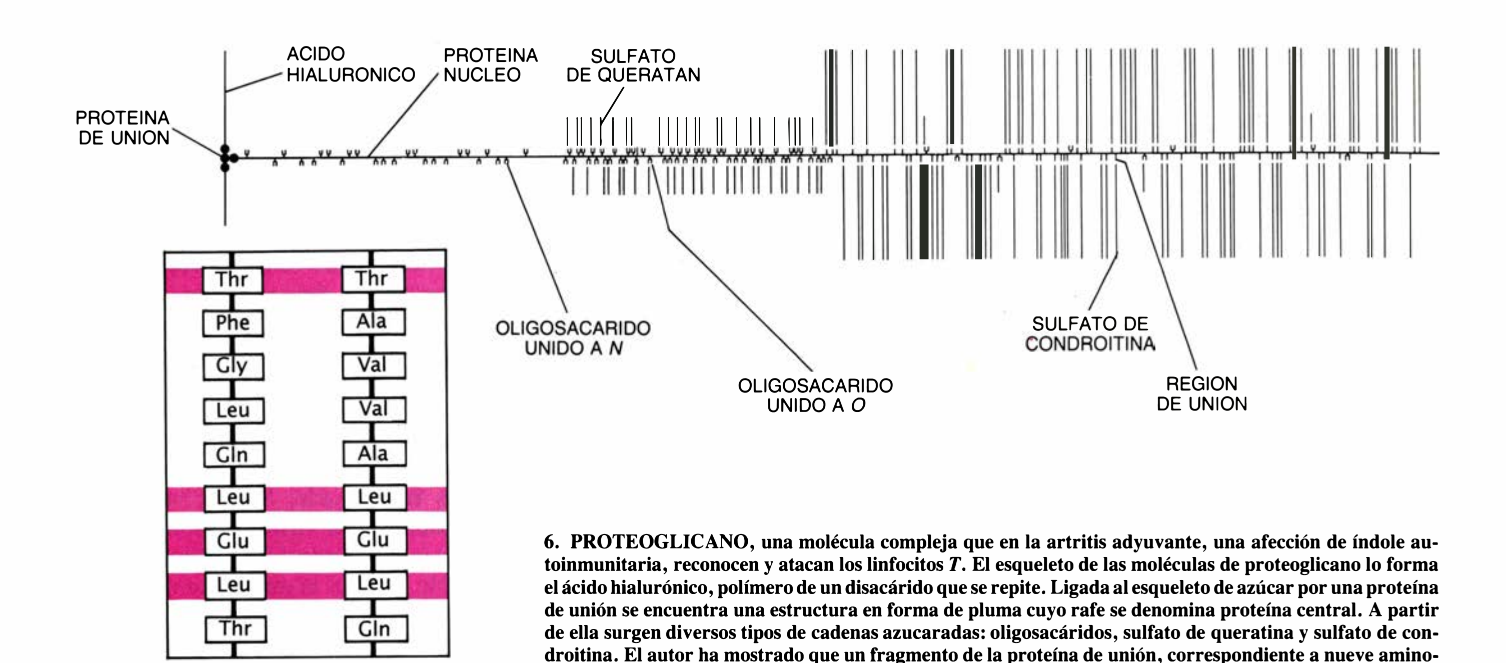
Nuestro razonamiento fue que sólo los investigadores humanos ignoraban la identidad del antígeno adecuado y que, con toda seguridad, los linfocitos *T* que causan la enfermedad lo reconocerían. De acuerdo con este planteamiento, Holoshitz cultivó células de ratas artríticas con ejemplares de *M. tuberculosis* pulverizados. Si en verdad actuaba el mimetismo antigénico y había antígenos bacterianos semejantes a los antígenos propios que sufrían el ataque en las ratas artríticas, las células *T* causantes de la enfermedad los entresacarían de los restantes antígenos bacterianos. En ese momento, por selección clonal, el clon pertinente predominaría. Y así ocurrió. La segunda línea de linfocitos *T* que se obtuvo inducía la artritis cuando se inyectaba en ratas. Holoshitz logró aislar un clon, A2b, que causaba la enfermedad con más virulencia incluso.

Después de instar a los antígenos





5. LESION DEL CARTILAGO, distintivo de la artritis adyuvante, que se produce cuando los linfocitos *T* atacan el cartílago de la articulación. La micrografía de la izquierda (tomada por Ritta Stanescu) muestra tejido de articulación de rata ocho días después de la inoculación de un "adyuvante" que contenía *Mycobacterium tuberculosis* (el patógeno de la tuberculosis), molido en aceite mineral. Los linfocitos *T* han empezado a invadir el cartílago (*capa superior del tejido*). La micrografía de la derecha, tomada 27 días más tarde, pone de manifiesto la arquitectura del cartílago alterada por los glóbulos blancos.



6. PROTEOGLICANO, una molécula compleja que en la artritis adyuvante, una afección de índole autoinmunitaria, reconocen y atacan los linfocitos *T*. El esqueleto de las moléculas de proteoglicano lo forma el ácido hialurónico, polímero de un disacárido que se repite. Ligada al esqueleto de azúcar por una proteína de unión se encuentra una estructura en forma de pluma cuyo rafe se denomina proteína central. A partir de ella surgen diversos tipos de cadenas azucaradas: oligosacáridos, sulfato de queratina y sulfato de condroitina. El autor ha mostrado que un fragmento de la proteína de unión, correspondiente a nueve aminoácidos, guarda semejanza con parte de una proteína de *Mycobacterium tuberculosis*: cuatro de los nueve aminoácidos son idénticos en ambos fragmentos. Ese parecido podría explicar la artritis adyuvante.

bacterianos a que entresacasen el clon de células *T* de interés, podíamos emplear ya esas células *T* en la búsqueda del antígeno propio. Tarea que correspondió realizar a Willem van Eden, quien, procedente de Holanda, se incorporó a mi laboratorio como becario postdoctoral. Van Eden cultivó el clon A2b junto con fracciones de ejemplares de *M. tuberculosis* molidos y varios componentes del tejido de la articulación. Tal como se esperaba, A2b reconoció una fracción micobacteriana (preparada por mi colega Ayalla Frenkel). Además, el clon reconocía el proteoglicano, una molécula del cartílago de la articulación formada por componentes glucídicos y proteicos; el epitopo reconocido por A2b resultó encontrarse en la porción de la molécula de proteoglicano denominada proteína central.

El doble reconocimiento ofrecía un interés particular, pues venía a sumarse al mimetismo antigénico advertido *in vitro*: un clon de células *T* de especificidad única había reconocido un antígeno foráneo y otro propio. Ya era posible explicar la artritis adyuvante como el resultado de un parecido entre aquellos dos antígenos.

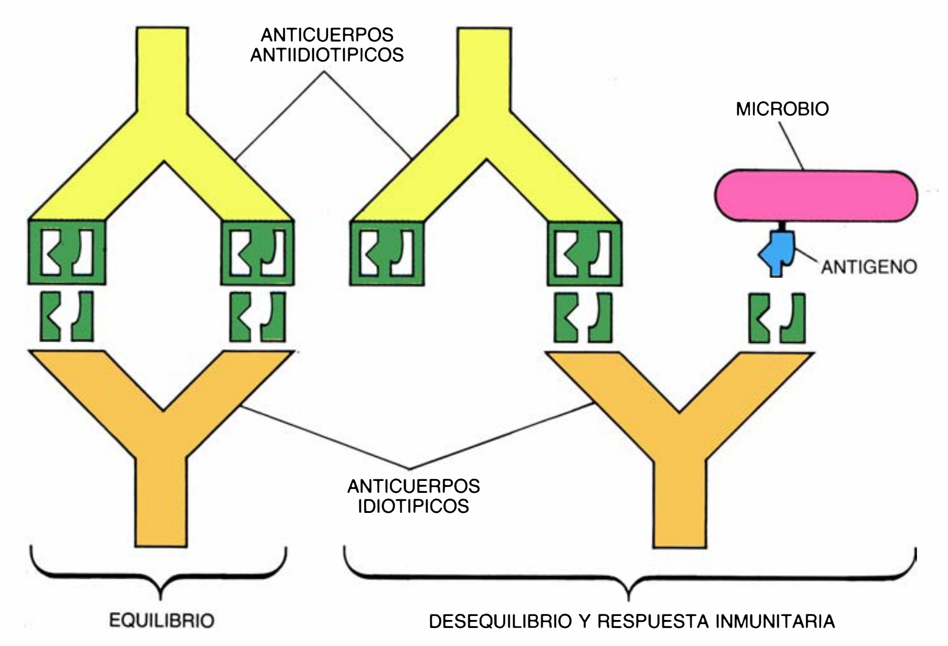
Pero, ¿cuáles eran los epitopos exactos involucrados en el fenómeno? El trabajo inicial de Van Eden había identificado sólo una fracción de la bacteria molida, no un epitopo específico. Para llegar a ese detalle habría que disgregar *M. tuberculosis* en sus componentes moleculares y determinar luego la molécula reconocida por A2b. Una vez identificada, podría romperse en fragmentos progresivamente menores, hasta encontrar la menor pieza capaz de ser reconocida por A2b, que constituiría el epitopo buscado.

Resulta sencillo describir el proceso, pero no hubiera podido realizarse sin valernos de una útil artimaña de la ingeniería genética. Ante la gran dificultad que ofrece el estudio de las micobacterias desde el punto de vista bioquímico, los científicos han recurrido a insertar sus genes en *Escherichia coli*, el organismo de laboratorio por excelencia, que se comporta bien y se conoce mucho mejor. Al expresar los genes *E. coli*, quedan a nuestra disposición grandes cantidades de antígenos micobacterianos susceptibles de estudio. La posibilidad de disponer de tales "bibliotecas de expresión" de las proteínas de *M. tuberculosis* brindaba un camino relativamente sencillo para identificar los antígenos que habían sido reconocidos por el clon A2b.

Van Eden analizó las respuestas de A2b frente a una biblioteca de expresión preparada por Jan D. A. van Embden y Jelle E. R. Thole, del Instituto Nacional holandés de la Salud e Higiene ambiental. Para nuestra satisfacción, A2b respondió a uno de los productos génicos micobacterianos, una proteína de un peso molecular de alrededor de 65.000 (el peso molecular del átomo de hidrógeno se toma igual a 1) cuya secuencia de aminoácidos ya había sido determinada. Thole y Embden obtuvieron fragmentos de la proteína y los sometieron a ensayo frente a A2b. Ruurd van der Zee, de la Universidad estatal de Groninga, sintetizó entonces cadenas de aminoácidos que abarcaban el área de la proteína que probablemente contenía el epitopo de interés. Se realizó la prueba con esas cadenas y se identificó el epitopo, que constaba de nueve aminoácidos.

No se ha determinado aún el parecido exacto que guardan el epitopo bacteriano y la fracción proteica del proteoglicano. Afortunadamente, se ha desentrañado una parte considerable de las secuencias de aminoácidos de los proteoglicanos. Se compararon los nueve aminoácidos del epitopo bacteriano con secuencias publicadas correspondientes a la proteína central y se halló un parecido con un segmento de la proteína de unión que engarza la proteína central con el esqueleto azucarado del proteoglicano. Cuatro de los nueve aminoácidos de los dos segmentos eran idénticos. En la actualidad estamos realizando los ensayos que habrán de dilucidar si ese parecido puede ser responsable del doble reconocimiento de los epitopos por parte del clon A2b y, por tanto, de la autoinmunidad que subyace a la artritis adyuvante.

¿Desempeña acaso el mimetismo molecular algún papel en la génesis de la artritis reumatoide en los humanos? No podemos dar todavía una respuesta definitiva, pero los primeros hallazgos parecen indicativos. Nuestro grupo investigó las respuestas inmunitarias de unos 50 pacientes afectos de artritis



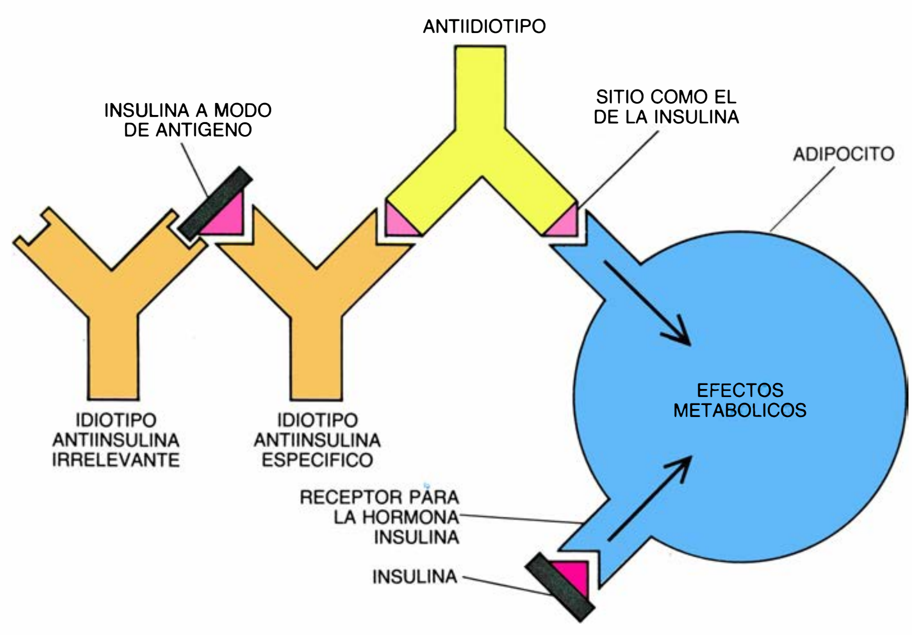
7. RED ANTIIDIOTIPICA que podría subyacer a la respuesta del sistema inmunitario ante la enfermedad. La especificidad de un receptor por su antígeno recibe el nombre de idiotipo. El antiidiotipo es el ajuste (también mediante un mecanismo de tipo llave y cerradura) de un segundo receptor con el primero. Bajo condiciones ordinarias de equilibrio, los receptores idiotípico y antiidiotípico se unirían y se mantendrían mutuamente bajo control (*izquierda*). Ante la presencia de un antígeno microbiano, éste se une a un receptor idiotípico y provoca un desequilibrio que desencadena la respuesta inmunitaria (*derecha*). Cabe otra posibilidad: que el equilibrio entre idiotipos y antiidiotipos limite los efectos dañinos de la autoinmunidad.

reumatoide o de una enfermedad degenerativa de las articulaciones que no tenía carácter autoinmunitario. Se expusieron los linfocitos *T* de ambos grupos a una fracción micobacteriana que contenía el epitopo que mimetizaba el del cartílago. Las células procedentes de pacientes con artritis reumatoide proliferaron, mientras que las demás presentaron tasas de multiplicación muy inferiores, comparables a las de las personas sanas.

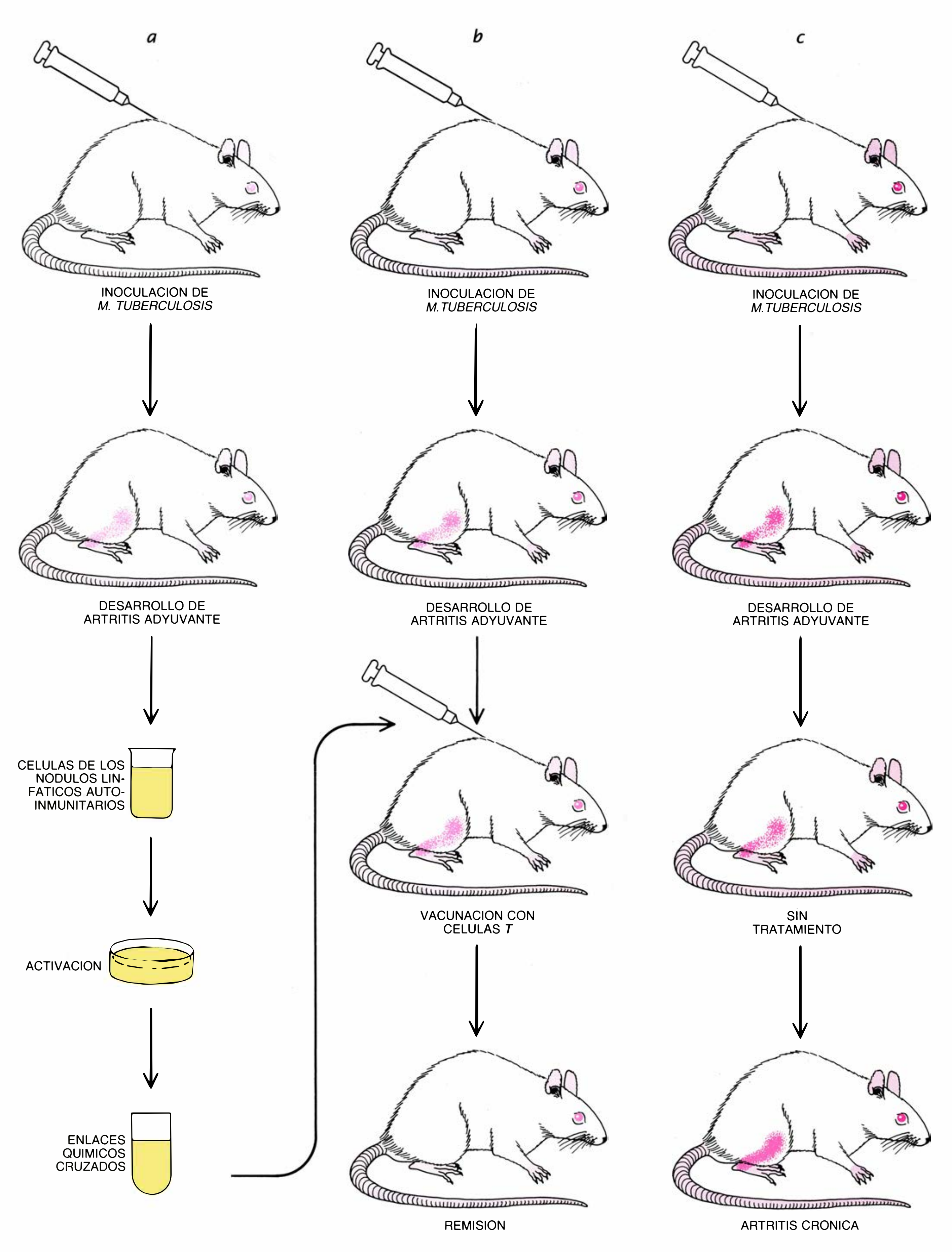
La artritis reumatoide parece estar asociada a una reactividad específica de las células *T* frente al antígeno micobacteriano. Tales hallazgos, sin embargo, no establecían, de ningún modo, una relación causal. La reactividad de los linfocitos podía ser el resultado de la artritis, y no su causa. Por ejemplo, quizá la artritis reumatoide provocara la respuesta de las células *T* frente a los proteoglicanos del cartílago, presentando éstas una reacción cruzada con los epitopos micobacterianos, que se parecen a los antígenos del cartílago. Ciertamente no existe una conexión obvia entre la infección de *M. tuberculosis* y el subsiguiente desarrollo de artritis reumatoide. Sin embargo, las micobacterias no virulentas son ubicuas y tal vez una exposición, clínicamente invisible, lleve a la autoinmunidad.

Se ha demostrado ese tipo de conexiones en el caso de otros patógenos. La fiebre reumática aguda, un cuadro caracterizado por inflamación del corazón, de las articulaciones y del sistema nervioso, va casi siempre precedida de una infección aguda (generalmente de la garganta y las amígdalas), provocada por alguna bacteria estreptocócica. En la década de 1960, Melvin H. Kaplan, de la Universidad Case Western Reserve, demostró que los anticuerpos fabricados por conejos contra antígenos estreptocócicos se unían también al tejido del corazón humano. Es preciso advertir, sin embargo, que, aunque los estreptococos de una determinada cepa porten epitopos que mimeticen a los humanos, sólo una pequeña minoría de las personas infectadas padece fiebre reumática aguda. Más aún, el ataque autoinmunitario suele ser breve. Se diría que el sistema inmunitario está capacitado para regular la autoinmunidad. Pero, ¿cómo?

Paradójicamente, la amplia gama del repertorio de receptores, causa del problema por abarcar tanto lo propio como lo externo, podría encerrar también la solución. A comienzos de la década de 1970, Niels Kaj Jerne, del Instituto de Inmunología de Basilea, avanzó una teoría de la inmunidad, basada en observaciones realizadas por varios investigadores, según la cual los receptores de los antígenos podrían, a su vez, ser reconocidos por otros receptores situados sobre linfocitos o anticuerpos. ¡Los receptores podían también ser antígenos! Así, además de receptores para cada epitopo (como había postulado Burnet) la hipótesis de Jerne contemplaría la existencia de receptores para cada receptor. La especificidad original del receptor, definida



8. CORTOCIRCUITO HORMONAL provocado por los efectos de la red idiotipo—antiidiotipo, según un esquema de los trabajos realizados en el laboratorio del autor. Ratones inmunizados frente a la insulina desarrollan anticuerpos contra varias estructuras de esa molécula, incluida la porción (*rojo*) que se une al receptor de la insulina de las células grasas. Entonces, espontáneamente, los ratones desarrollan anticuerpos antiidiotípicos que se unen al receptor idiotípico. Los receptores de los anticuerpos antiidiotípicos se asemejan a la configuración de la parte de la insulina que se une al receptor de ésta. Por consiguiente, los receptores antiidiotípicos se fijan también al receptor de la insulina, causando una afección similar a la diabetes.

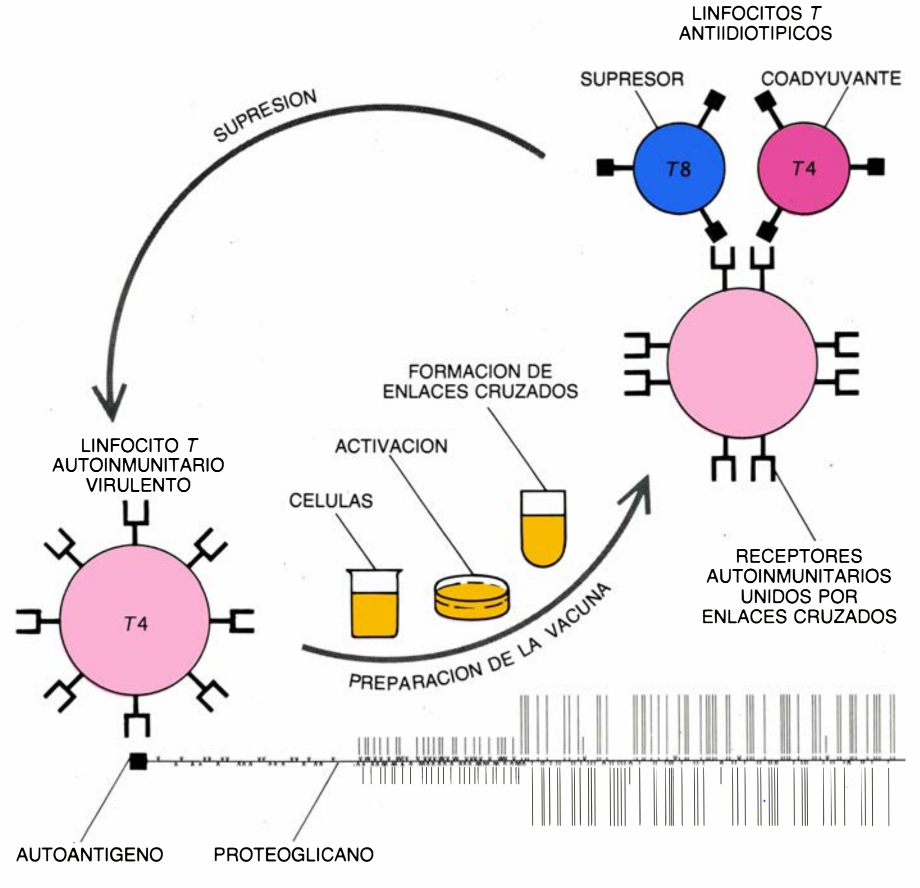


9. VACUNA CONTRA LA AUTOINMUNIDAD creada por el autor y sus colegas. Se inoculó en tres grupos de ratas un adyuvante que contenía *M. tuberculosis*. Los tres desarrollaron artritis adyuvante. Se recuperaron células autoinmunitarias de los nódulos linfáticos de uno de los grupos (*a*) y se potenciaron sus efectos inmunogénicos, inyectándose seguidamente en el segundo grupo (*b*). El grupo vacunado vio remitir la enfermedad. El no tratado desarrolló artritis.

por Burnet, recibe el nombre de idiotipo; antiidiotipo es la especificidad del receptor del receptor.

El planteamiento tiene implicaciones notables. Si se concibe el epitopo como una llave y el receptor idiotípico como una cerradura, ¿qué es el receptor antiidiotípico? Dada su complementariedad con el idiotipo (la cerradura), el receptor antiidiotípico debe poseer la forma de la llave. La llave, sin embargo, presenta también la forma del epitopo. Por tanto, el epitopo y el receptor antiidiotípico pueden tener la misma forma. Jerne admitió que, además de un conjunto de receptores, complementario para los antígenos de los demás, el sistema inmunitario poseía un conjunto de receptores (los antiidiotípicos) homólogos a los antígenos de los demás, es decir, que el sistema no sólo contenía lo propio, sino también lo ajeno. Esa red de reconocimiento de lo propio establece un equilibrio que, según Jerne, regula el comportamiento del sistema inmunitario.

Las ideas de Jerne han propiciado numerosos experimentos y se van acumulando los resultados que apoyan su modelo reticular. Varios investigadores han encontrado que la inmunización con un epitopo conduce a la producción de anticuerpos complementarios del epitopo, lo cual va seguido de la producción de anticuerpos antiidiotípicos que mimetizan la forma del epitopo. Yoram Shechter, Ruth Maron, Dana Elias y el autor realizaron experimentos de este tipo en ratones. Empleamos un epitopo de la insulina y obtuvimos un anticuerpo antiidiotípico que se parece a la parte pertinente de la molécula de la insulina. (Acabamos de encontrar anticuerpos antiidiotípicos que mimetizan a la insulina en la sangre de algunos pacientes de la forma autoinmunitaria de la diabetes. Se ignora la función de esos anticuerpos.) En un nivel más práctico, se espera explotar los anticuerpos antiidiotípicos en la preparación de vacunas: el antiidiotipo, que mimetiza la forma del epitopo microbiano (y por tanto induce inmunidad), resulta inocuo.



10. POSIBLE MECANISMO de la vacuna frente a la artritis adyuvante. Las células decisivas son las *T*4 autoinmunitarias virulentas, con receptores para el proteoglicano, obtenidas de ratas artríticas. La preparación de la vacuna exige la agregación de los receptores, proceso que incrementa su potencia. Cuando se inyectan en otras ratas afectas de artritis, los receptores agregados desencadenan la intervención de células *T*4 y *T*8 antiidiotípicas. Las células *T*8 son "supresoras", que pueden inhibir la proliferación de los linfocitos autoinmunitarios. Las células *T*4 son "coadyuvantes" (*helper*). Las células colaboradoras facilitan el crecimiento de células *B* y *T*; sin embargo, su función en la rata vacunada todavía no se conoce bien.

Si el reconocimiento de lo propio a través de la formación de receptores antiidiotípicos constituye el centro del sistema, ¿qué distingue el reconocimiento saludable de lo propio del que tiene lugar en la enfermedad autoinmunitaria? Los inmunólogos que aceptan las ideas de Jerne propondrían que el equilibrio entre los receptores idiotípicos y antiidiotípicos confiere tolerancia a los epitopos propios e impide la enfermedad autoinmunitaria. El reconocimiento dañino de lo propio, seguirían, está controlado por el calibre de la red, y no por la mera presencia o ausencia de un antígeno específico. Ciertamente parece que el sistema inmunitario puede convivir con la autoinmunidad y controlarla. Como he mencionado antes, los linfocitos *T* capaces de causar la EAE pueden persistir en ratas que se han recuperado de la enfermedad, así como las personas se recuperan de la fiebre reumática y de otras alteraciones autoinmunitarias.

Si bien el modelo de la red ofrece una interpretación convincente de la autoinmunidad, no se ha demostrado de manera concluyente. Ello no obstante, se han dado ya los primeros pasos hacia la prevención y tratamiento de las enfermedades autoinmunitarias. Puesto que disponíamos de los clones específicos de linfocitos *T* responsables de la EAE, de la artritis adyuvante y de otras enfermedades experimentales, decidimos comprobar si podían utilizarse como "vacunas" contra la inmunidad.

El primer paso consistió en tomar la línea de células *T* antiproteína básica, responsable de la EAE, y someterla a radiaciones gamma. Las células tratadas perdieron su virulencia y la capacidad de inducir EAE cuando se inyectaban en ratas. Pese a ello, los animales a los que se les inoculaba las células adquirían resistencia permanente a la EAE: la inmunización de las ratas con la proteína básica no desencadenaba ya el ataque a los tejidos del sistema nervioso central. Las ratas estaban capacitadas para responder a otros antígenos y desarrollar incluso artritis adyuvante cuando se exponían a los antígenos de *M. tuberculosis*. Habíamos obtenido una vacuna experimental. Su fundamento residía en inmunizar las ratas frente a las células *T* que poseían receptores para la proteína básica.

La vacunación con linfocitos *T* se extendió rápidamente a la artritis adyuvante. En colaboración con mi colega

Meir Sinitzky encontramos que podía incrementarse la potencia de la "vacuna" si se agregaban en una masa los receptores de los linfocitos *T*; así lo realizamos por medios físicos (mediante presión hidrostática) y químicos (mediante agentes que formaban enlaces cruzados con los receptores de la superficie de la célula). Según parece, la agregación de los receptores multiplica su capacidad de generar linfocitos antiidiotípicos y, lo que quizá resulta más curioso, la vacuna sirve también de terapia: las ratas que recibían linfocitos *T* unidos por enlaces cruzados, obtenidos de otras ratas enfermas, experimentaban una remisión permanente de su enfermedad autoinmunitaria.

Todavía no se conoce bien el mecanismo por medio del cual la vacunación con células *T* induce resistencia al proceso autoinmunitario, pero se están acumulando datos valiosos. Nuestro trabajo más reciente confirma que, en respuesta a la vacunación, aparecen linfocitos *T* antiidiotípicos que reconocen específicamente los receptores de las células *T* causantes de la enfermedad. Entre los linfocitos antiidiotípicos se incluyen las células que portan el marcador *T*4 y células de tipo *T*8. Las *T*4 son colaboradoras y, las *T*8, supresoras, que inhiben el crecimiento de los clones de otros linfocitos. Ignoramos cuál es el responsable de la resistencia a la enfermedad autoinmunitaria. Según parece, los dos grupos trabajan de manera concertada en la regulación de los linfocitos que causan la enfermedad autoinmunitaria.

La vacunación con linfocitos *T* y su eficacia en la activación de los linfocitos capaces de modular la autoinmunidad encajan en el marco general de la hipótesis de la red de Jerne. Pero nuestras observaciones no corroboran el papel filosófico que Jerne postula; habrá que seguir trabajando. En todo caso, lo realizado hasta ahora ha dejado bien asentado que la línea que separa lo propio de lo ajeno no es tan nítida como se creía. El reconocimiento de lo propio no es meramente un pecado castigado con la enfermedad autoinmunitaria, como creyeron Burnet y otros. Antes bien, es algo crucial para la salud y para la enfermedad. El sistema inmunitario es mucho más complejo de lo que parecía cuando los inmunólogos pensaban que se limitaba a detectar el mundo externo. Su conocimiento podría convertirse en una ayuda eficaz contra el dolor que causa la enfermedad autoinmunitaria.

El paradigma de la membrana en los agujeros negros

¿Cómo representar la interacción entre un agujero del espacio-tiempo y la materia y los campos de su entorno? Resulta instructivo imaginarse el agujero negro como una membrana conductora de electricidad

Richard H. Price y Kip S. Thorne

¿No hay manera de esbozar una explicación llana de los agujeros negros? Esas huellas de la relatividad general, que atrapan la luz, curvan el espacio y enlentecen el tiempo, ¿tienen cabida en el catálogo astrofísico de objetos que presentan un comportamiento intuitivamente claro? Se acepta hoy la existencia de los agujeros negros y se les ha asignado una función en la astrofísica; se les considera, en concreto, fuente probable de energía de los cuásares: focos puntuales y distantes que brillan como una galaxia entera. Para entender ese papel sin grandes dificultades, hemos desarrollado, junto con nuestros colegas, un nuevo paradigma de los agujeros negros, una nueva representación y descripción de los mismos. Hasta donde es posible, consideramos los agujeros negros unos objetos astrofísicos más, constituidos por materia real. Según nuestra descripción, un agujero negro es una superficie, esférica o achatada, formada por una fina membrana conductora de la electricidad.

Como entidades teóricas, los agujeros negros gozan ya de una historia dilatada. Hace doscientos años, John Michell, un físico inglés, y Pierre-Simon Laplace, matemático francés, predijeron, independientemente, la existencia de "cuerpos oscuros": objetos astronómicos con una atracción gravitacional tan intensa que ni la luz podría escaparse de ellos. La predicción, basada en la teoría corpuscular de la luz formulada por Newton y en su teoría de la gravedad, entendida como acción a distancia, no aguantó mucho tiempo. A principios del siglo XIX los experimentos revelaron que la luz no constaba de corpúsculos, según aseguraba Newton, sino de ondas, y apuntalaron así la teoría ondulatoria de la luz enunciada por James Clerk Maxwell. Laplace, que veía cómo se desmoronaba el fundamento de su predicción, se retractó.

Sin embargo, en 1917 se introduce la relatividad general, y la descripción newtoniana de la gravedad deja el camino a la einsteniana. Los físicos cayeron entonces en la cuenta de que las ondas luminosas de Maxwell, inmunes a la gravedad newtoniana, podían ser atrapadas por la gravedad de Einstein. Las primeras indicaciones observacionales sobre este fenómeno tuvieron lugar en 1919, cuando los astrónomos observaron, durante un eclipse, que los rayos de luz provenientes de estrellas distantes eran desviados, aunque muy levemente, por el Sol. A partir de las ecuaciones de la relatividad general, inferíase, por vía directa, que si el Sol se comprimía conservando su masa, la luz de las estrellas que pasara rozando su superficie se desviaría aún más. Finalmente, cuando la circunferencia del Sol alcanzara 18,5 kilómetros, la luz de las estrellas quedaría atrapada, igual que ocurriría con la luz emitida por el Sol. El astro se convertiría en un cuerpo oscuro, de apariencia similar a los cuerpos oscuros de Michell y Laplace.

Ahora bien, la estructura física de los cuerpos oscuros de la relatividad general difiere radicalmente de la asignada a los cuerpos oscuros del siglo XVIII y es muchísimo más sugestiva. No están hechos de materia, aunque tienen masa y pueden ser creados con materia estelar mediante un proceso de colapso gravitatorio. Una vez formados, constan de espacio-tiempo curvado, envuelto sobre sí mismo con intensidad tal que atrapa la luz: una estructura imposible de imaginar antes de Einstein. En 1968, John Archibald Wheeler, de la Universidad de Princeton, acuñó la expresión "agujeros negros" para designar tales objetos.

Fueron necesarias más de cuatro décadas para que los físicos teóricos se tomaran en serio los agujeros negros que predecía la relatividad general, como algo que valiera la pena buscar en el universo real. Los astrónomos se mostraron más reticentes a la idea. Hasta mediada la década de los sesenta, muchos astrónomos consideraban el universo un sitio apacible donde la razón de la mayoría de los fenómenos allí desarrollados se conocía: un lugar sin cabida para algo tan extravagante como un agujero negro.

Pero el descubrimiento de los cuásares en 1963 sacudió ese estado de cosas. Sus enormes emisiones de energía evidenciaban la necesidad de una masa titánica para generarla; sus rápidas fluctuaciones de luminosidad sugerían, por otro lado, que su fuente central de energía debía ser muy compacta. Masas grandes y tamaños pequeños implicaban la existencia de un campo gravitatorio intenso y se empezó a apuntar hacia los agujeros negros. Así las cosas, en 1967 llegó el descubrimiento de los púlsares, objetos que emiten pulsos de ondas de radio con una regularidad inexplicable a primera vista. En el plazo de un año quedaba resuelto el caso; los púlsares eran estrellas de neutrones en rotación, objetos de una densidad inimaginable y una masa aproximadamente igual a la solar encerrada en una circunferencia de unos 60 kilómetros. Este tamaño triplicaba sólo el de un agujero negro con la misma masa: comprímase una estrella de neutrones hasta convertirla en un tercio de la misma, afirmaba la relatividad general, y se transformará en un agujero negro.

Desde entonces han venido multiplicándose las sorpresas y paradojas en los telescopios, antenas de radio y otros

detectores, a una velocidad tal que los astrónomos han acabado por perder la confianza en sus esquemas teóricos de partida. Los agujeros negros, nacidos del colapso gravitacional de una o muchas estrellas, se han convertido en una posibilidad a la que recurren de manera rutinaria para intentar explicar sus observaciones. Por citar un caso, se acaba de establecer el principio según el cual un agujero negro con una masa mínima de 100 millones de soles constituye la causa primera de un cuásar.

La atribución a los agujeros negros de un papel en la astrofísica despierta todavía algunas reticencias, cuya raíz hay que buscarla en el concepto de paradigma establecido por Thomas S. Kuhn. Kuhn, un físico que se pasó a la filosofía e historia de la ciencia, introdujo el término a mediados de los años sesenta para describir el conjunto de instrumentos utilizado por una comunidad científica a la hora de abordar un tema específico. Los paradigmas de la física teórica comprenden, por ejemplo, ecuaciones que encierran las leyes físicas relevantes, muchos problemas concretos que han sido resueltos con dichas ecuaciones y —lo que es más importante para nuestros propósitos— un conjunto de imágenes o diagramas con un vocabulario adecuado, que expresa parte de las matemáticas de manera potente y heurística. Las imágenes, los diagramas y el vocabulario son la clave para la intuición física. La intuición posibilita esos súbitos chispazos de la inteligencia que hacen avanzar rápidamente las fronteras del conocimiento. Las matemáticas son, por supuesto, el árbitro definitivo; sólo ellas permiten asegurar que los saltos sean correctos.

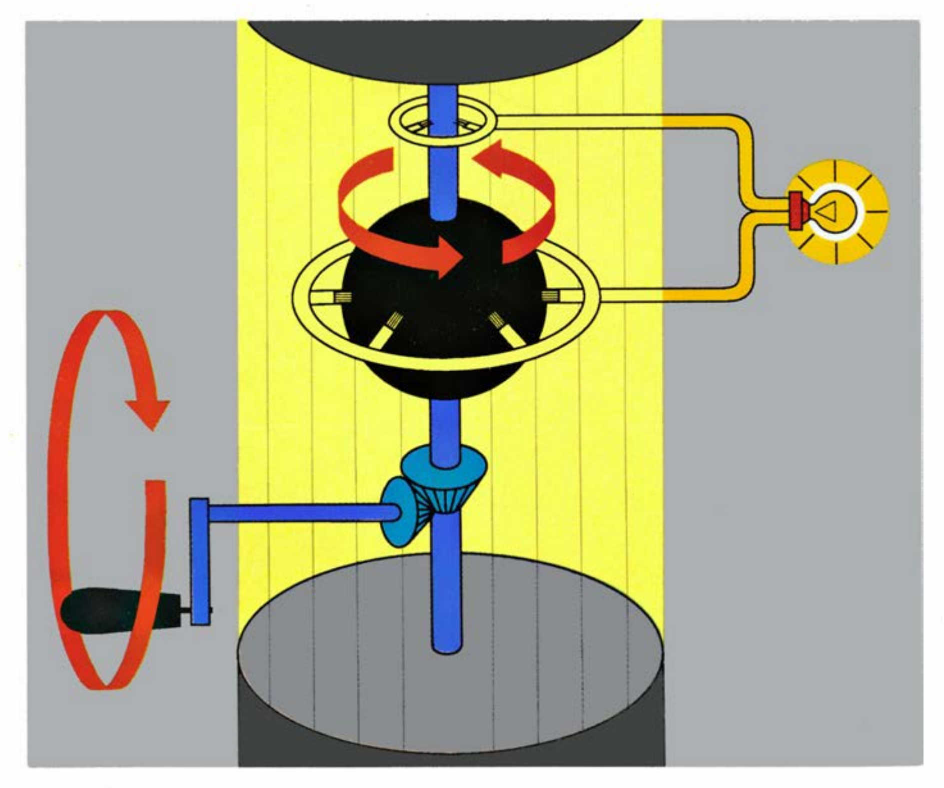
En las décadas de los sesenta y los setenta, los físicos desarrollaron un paradigma elegante y poderoso de los agujeros negros: el paradigma del espacio-tiempo curvo. Emplea el utillaje matemático de la relatividad general, que describe el espacio y el tiempo como una sola entidad, cuadridimensional. Sus imágenes características son los diagramas de espacio-tiempo, que muestran el tiempo y dos de las tres dimensiones del espacio. Las curvas denominadas líneas de universo indican las trayectorias de partículas tales como los fotones (paquetes de luz) a través del espacio-tiempo.

En esos diagramas de espacio-tiempo, el agujero negro se representa por una superficie cilíndrica —el horizonte—, donde la intensa gravedad curva de tal suerte el espacio-tiempo que los propios fotones quedan atrapados en la superficie o en su interior. El horizonte señala un punto sin retorno: los fotones y cualquier otra clase de partícula pueden caer a través del horizonte hacia el interior, pero ninguno puede salir del agujero. El horizonte corta todas las comunicaciones entre el agujero y el resto del universo.

Estos diagramas y los demás instrumentos del paradigma del espacio-tiempo curvo han permitido hacerse una imagen mejor de la naturaleza física de los agujeros negros que permanecen aislados, lejos de la influencia del universo externo. Pero a los astrofísicos no les basta con esa imagen. La consideración del agujero negro como objeto astrofísico —la fuente de energía de un cuásar, por ejemplo— exige entender de qué forma interacciona el agujero con el gas y los campos magnéticos de su entorno. Por desgracia, no es fácil estudiar dichas interacciones en el marco del paradigma del espacio-tiempo curvo. El espacio-tiempo curvo es, en lo esencial, incompatible con las imágenes sobre las que los astrofísicos basan sus análisis acerca de plasmas magnetizados (gases ionizados calientes). Está formulado en el lenguaje del espacio-tiempo cuadridimensional unificado, mientras que las descripciones de los plasmas magnetizados se redactan en el lenguaje habitual del espacio tridimensional, donde el tiempo es una coordenada aparte.

Entonces, ¿cómo se las han arreglado los astrofísicos teóricos para explicar los cuásares mediante los agujeros negros? Hasta finales de la década de los setenta, los investigadores solían eludir la incompatibilidad de lenguajes e imágenes, evitando el paradigma del espacio-tiempo curvo. En vez de considerar la gravedad como una curvatura del espacio-tiempo, volvieron al paradigma newtoniano de la gravedad entendida como fuerza de atracción. Donde la gravedad era débil (lejos del horizonte), las predicciones de la gravedad newtoniana y einsteiniana coincidían con ajustada precisión; donde la coincidencia fallaba (cerca del horizonte), los teóricos detenían arbitrariamente sus cálculos.

Valiéndose de este enfoque, los primeros modelos de cuásares explicaban que la adición de materia constituía una fuente de energía. Un agujero negro emplazado en una región de gas interestelar denso incorporaría materia



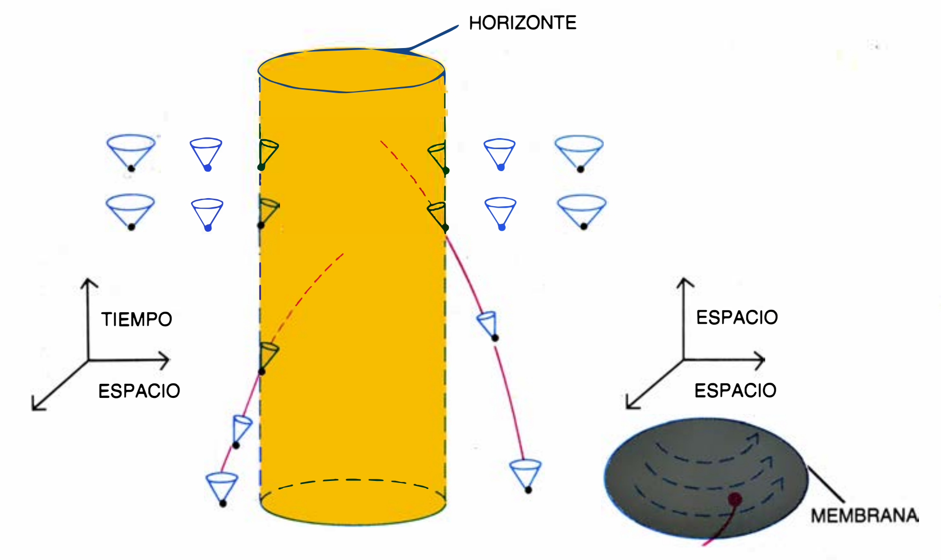
1. GENERADORES ELECTRICOS DE LABORATORIO y agujeros negros que suministran energía a los cuásares— objetos astronómicos brillantes y alejados— pueden compartir ciertos rasgos. Este sencillo generador extrae energía de una esfera metálica que gira entre los polos de un imán. El movimiento del metal conductor en el seno de las líneas de campo magnético genera una diferencia de potencial entre los polos de la esfera y su ecuador. Unas escobillas establecen contacto eléctrico en los ejes y en el ecuador y unos alambres completan un circuito que proporciona energía a una bombilla. Los autores, que partieron del trabajo de Roger D. Blandford y Roman Znajek, sostienen que un agujero negro en un cuásar puede representarse así: cual una membrana giratoria de material conductor en interacción con un campo magnético.

debido a su gravedad; el flujo hacia dentro sería esférico si el gas poseía escaso momento angular, pero se concentraría en un disco en el caso, más corriente, de que el material se hallara en rotación. A medida que el gas fluyera hacia el interior se comprimiría y calentaría; como todo gas caliente, emitiría radiación en diversas formas: ondas de radio, luz y rayos X. Al calcular la emisión de energía, los teóricos tomaban en consideración la radiación proveniente de una región que se extendía casi hasta el punto donde la gravedad einsteiniana produciría un horizonte; allí los cálculos se cortaban por lo sano.

Este enfoque, por burdo que nos parezca hoy, encerraba unos errores que resultaban modestos en comparación con la ignorancia sobre los procesos físicos que tenían lugar en la turbulenta acreción del gas caliente. El esfuerzo de los autores, y de otros, por reproducir el mismo proceso en el paradigma más exacto del espacio-tiempo curvo, apenas logró algo. Así, pues, para explicar la atracción gravitatoria de un agujero negro, los inconvenientes astrofísicos del paradigma del espacio-tiempo curvo eran salvables.

Pero la atracción gravitatoria no es la única fuente de energía de los agujeros negros. Tal como demostró en 1969 Roger Penrose, de la Universidad de Cambridge, un agujero negro puede almacenar cantidades ingentes de energía en forma de rotación. James M. Bardeen, de la Universidad de Washington, indicó poco después que veía muy probable que los agujeros negros desarrollaran giros veloces en el universo real: conforme la materia en rotación a velocidades típicas va colapsando para formar un agujero negro o se incorpora en un agujero ya existente, girará cada vez más deprisa a medida que se mueva hacia dentro, imprimiendo una rápida rotación al agujero. La energía rotacional de un agujero ofrecía una intrigante alternativa para el suministro energético de un cuásar.

Los cálculos numéricos abonan la hipótesis de la rotación como fuente de energía. Un agujero negro de una masa dada tiene una tasa máxima de rotación: si la materia que implosiona o se añade gira demasiado deprisa, las fuerzas centrífugas contrarrestan la atracción gravitatoria en sentido contrario e impiden que la materia caiga hacia el agujero y aceleren aún más su giro. Es probable que la mayoría de los agujeros negros gire a un ritmo muy cercano al máximo, de modo que es posible estimar la cantidad de energía almacenada en su rotación. La energía rotacional de un agujero negro con una masa de 100 millones de soles (unos 3×10^{48} kilowatt-hora) sería más o menos la necesaria para mantener un cuásar brillando con su luminosidad observada durante el tiempo de vida más largo de los plausibles, varios miles de millones de años.



2. DISTINTAS REPRESENTACIONES DE UN AGUJERO NEGRO según estemos en el paradigma del espacio-tiempo curvo (*izquierda*) o en el paradigma de la membrana (*derecha*). El espacio-tiempo curvo combina el espacio y el tiempo en el espacio-tiempo cuadridimensional unificado. (La ilustración omite una dimensión espacial.) Los "conos de luz" muestran la propagación de la luz emitida en los distintos puntos a través del espacio-tiempo; las "líneas de universo" (*rojo*) señalan las trayectorias de las partículas. Cualquier partícula dotada de masa se ha de mover más despacio que la luz; en consecuencia, los conos de luz de los puntos de su línea de universo envuelven la línea por completo. Lejos del agujero negro, todos los conos de luz se abren directamente hacia arriba; cerca del agujero todos se inclinan hacia dentro, debido a que la gravedad del agujero afecta a la propagación de la luz. Una superficie vertical llamada horizonte es tangente a los ejes exteriores de los conos de luz. Por tanto, un fotón de luz puede quedar suspendido allí, moviéndose según la tangente, pero una partícula con masa debe caer en el agujero a través del horizonte. En el paradigma de la membrana, el agujero negro se representa en el espacio ordinario tridimensional mediante una membrana esferoidal que posee la misma circunferencia que el horizonte del espacio-tiempo curvo. El esferoide está aplanado porque el agujero gira. Los fotones (*en color azul*) pueden quedar suspendidos sobre la membrana que, al girar, los arrastra; las partículas con masa caen en el agujero a través de la membrana.

Pero, hasta 1977, nadie pudo encontrar un mecanismo astrofísicamente creíble para extraer esa energía rotacional. La imagen newtoniana de los agujeros negros no ofrecía pistas de un mecanismo así: en la física newtoniana un campo gravitacional se comporta exactamente igual, gire su fuente o se encuentre estacionaria. Hay una componente de un campo gravitacional inducida rotacionalmente que es einsteiniana, un fenómeno relativista que no admite ningún símil en la gravedad newtoniana.

La búsqueda de un mecanismo de extracción de energía continuó sin desmayo y en 1977 Roger D. Blandford, de Cambridge, y su alumno de doctorado Roman Znajek lograron demostrar, sirviéndose de las matemáticas de la relatividad general, que las líneas de campo magnético que ensartan el horizonte de un agujero negro pueden extraer su energía rotacional. Cuando estudiamos el análisis matemático hubimos de aceptarlo. El trabajo matemático era impecable. Pero no se veía tan clara la imagen física intuitiva. Carecíamos de representaciones o lenguajes sencillos con que describir la interacción entre el agujero en rotación y el campo magnético.

Nuestro intento por dar una imagen plástica del proceso de Blandford-Znajek nos llevó a crear el paradigma de la membrana. Nuestra estrategia consistía en traducir las matemáticas, que los agujeros negros habían tomado prestadas de la relatividad general, al mismo lenguaje del espacio tridimensional que se utiliza con los plasmas magnetizados, proponiendo un nuevo conjunto de diagramas y esquemas de agujeros negros en consonancia con el lenguaje. La traducción la emprendió a principios de la década de los 80 un grupo de investigadores que estaban entonces en el Caltech y que se hallan hoy diseminados por los Estados Unidos y Europa. La Sociedad del Paradigma de Caltech ("The Caltech Paradigm Society"), como dio en autodenominarse, incluía a Douglas A. MacDonald, Wai Mo Suen, Ian H. Redmount, Xiao-He Zhang, Ronald J.

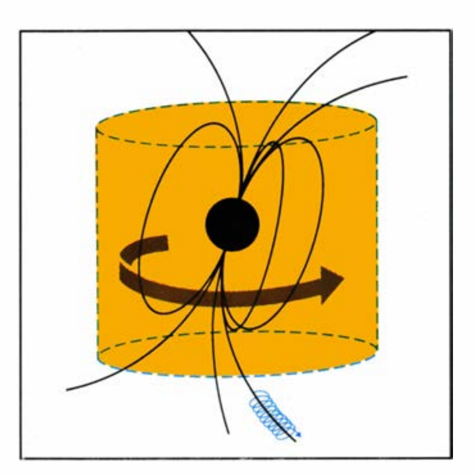
Crowley, Wojciech H. Zurek y los autores de este artículo.

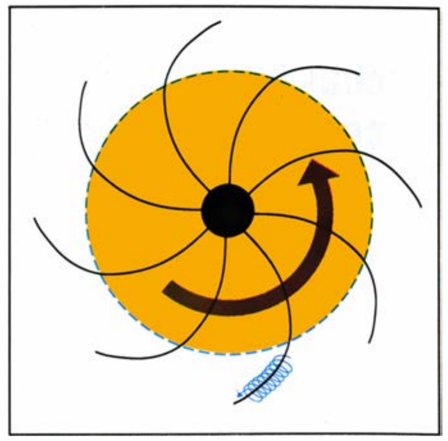
A la luz del paradigma de la membrana, el agujero negro constituye un sencillo objeto tridimensional no muy distinto de su pariente más cercano, la estrella de neutrones. La estrella de neutrones en rotación suministra energía a un púlsar mediante los campos magnéticos. La descripción clásica del mecanismo del púlsar constituyó una valiosa referencia cuando buscábamos una imagen análoga que permitiera comprender de dónde sacan los cuásares la energía. Vale, pues, la pena recordarla aquí.

A pesar de su nombre, una estrella de neutrones, nacida tras el colapso del núcleo de una estrella masiva, no sólo contiene neutrones, sino también protones y electrones que la hacen muy conductora, incluso superconductora. En una estrella de neutrones, las corrientes eléctricas persisten casi indefinidamente, igual que los campos magnéticos a que dan lugar. Con un lenguaje paradigmático muy plástico se afirma que esos campos magnéticos han quedado "congelados" dentro del material altamente conductor.

La estrella de neutrones se parece a un imán permanente; nos la podemos imaginar con sus líneas de campo magnético saliendo de cierta región (el polo norte), curvándose luego a través del espacio para volver a entrar por el polo sur de la estrella. Este imán astrofísico gira. Las estrellas normales, de las cuales nacen las estrellas de neutrones, giran siempre, por lo menos un poco, y el colapso que da lugar a la estrella de neutrones acelera la rotación. Por ese motivo se sospecha que la mayoría de las estrellas de neutrones nacen girando muy deprisa, con un periodo comprendido entre una milésima de segundo y un segundo. Como el campo magnético de una estrella de neutrones está congelado en su interior, eléctricamente conductor, las líneas de campo magnético deben también girar.

La imagen mental de las líneas de campo magnético sugieren una importante consecuencia de la rotación: aun cuando la estrella de neutrones gire lentamente, a una distancia suficiente estas líneas imaginarias se hallarán dando vueltas por el espacio; lo harán a una velocidad mayor que la de la luz. Las partículas cargadas (el plasma) que se hallan en el entorno de una estrella de neutrones están congeladas en las líneas de campo, de igual suerte que las líneas de campo están congeladas en el interior de la estrella de neutrones.





3. ENERGIA EMITIDA POR UN PULSAR. Para explicarlo, podemos imaginarnos las líneas de campo magnético "congeladas" dentro del interior conductor de una estrella de neutrones en rotación (*izquierda*) —objeto compacto y denso que hay en el centro de un púlsar. Traspasado cierto radio (*cilindro*), las líneas de campo barren el espacio antes que la luz. Las partículas cargadas que describen espirales en torno a las líneas no pueden moverse con esa velocidad; el resultado, visto desde arriba (*derecha*), es que las partículas curvan las líneas hacia atrás y se deslizan a una velocidad algo menor que la lumínica. La rotación de la estrella provoca, en virtud de ello, un flujo de plasma que acaba transformándose en radiación.

Ahora bien, las partículas no pueden moverse más deprisa que la luz; se resisten, por consiguiente, a la rotación curvando las líneas hacia atrás y deslizándose hacia afuera, cuan largas son, a velocidades un poco por debajo de la celeridad de la luz. De este modo, las líneas de campo constituyen un mecanismo que transfiere la energía rotacional de la estrella al plasma que sale despedido.

Los detalles relativos a la transformación de la energía en emisiones radiopulsantes y en otros fenómenos típicos de los púlsares son complicados y no es éste el momento de explicarlos. De lo que aquí se trata es que se puede obtener una buena visión general sobre la naturaleza de los púlsares y su influencia en los entornos a través de imágenes muy sencillas (líneas de campo magnético) y esquemas elementales (la congelación conjunta de las líneas de campo y los conductores). De este tenor son los mecanismos mentales con que nos gustaría contar para explicar de qué forma un campo magnético podría extraer, de un agujero negro, energía de rotación.

Nuestro primer cometido consistió en sacar a los agujeros negros del espacio-tiempo cuadridimensional y acomodarlos en el espacio tridimensional. No buscábamos sólo representarlos de una manera más inmediata; ocurre también que, en el espacio-tiempo, los campos magnéticos no constituyen entidades autónomas. Antes bien, pierden su identidad y se fusionan con los campos eléctricos en un campo electromagnético, único y unificado, que da al traste con la intuición física ordinaria. Al objeto de dividir el campo unificado en campos magnéticos y eléctricos separados, redefinimos un espacio tridimensional coherente con las matemáticas del espacio-tiempo unificado.

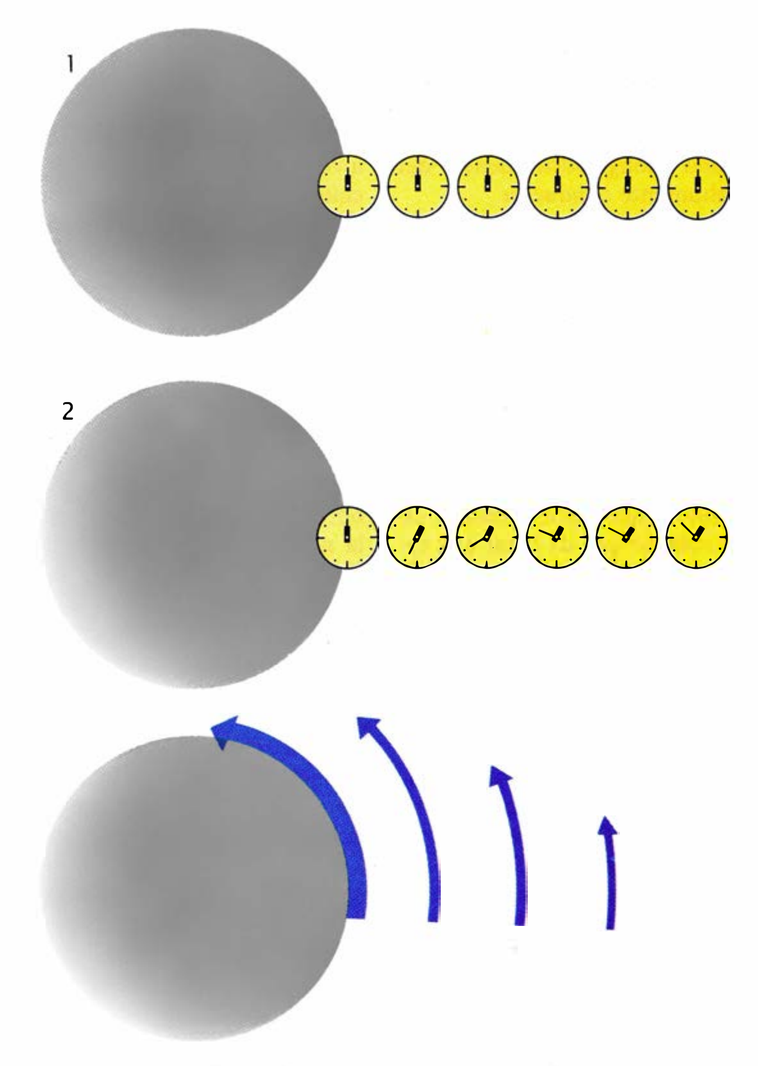
Para hacerlo precisamos de un equipo de observadores. En las teorías de Einstein, un observador sería un sujeto que lleva consigo un pequeño sistema de referencia consistente en unas reglas graduadas alineadas y un conjunto de relojes sincronizados para determinar los lugares de los sucesos y medir velocidades, aceleraciones, etcétera. La teoría de la relatividad afirma que dos observadores, situados en un mismo punto aunque moviéndose uno respecto del otro, obtendrán distintos valores de muchas magnitudes físicas. Quizá sorprenda incluso más esta otra observación: los observadores diferirán en la definición que den de su espacio tridimensional. No se pondrán de acuerdo sobre qué puntos del espacio-tiempo concurren en el mismo tiempo: qué puntos conforman el espacio tridimensional en dicho instante.

El espacio tridimensional, por tanto, y con él un campo magnético independiente, sólo puede definirse en función de un observador determinado. En el paradigma de la membrana recobramos un campo magnético independiente, así como la posibilidad de imaginar líneas de campo magnético en torno a un agujero negro, eligiendo un observador en cada región del espacio-tiempo. El resultado es una familia de observadores que constituyen una "sección" tridimensional del espacio-tiempo y definen, por tanto, qué parte del campo electromagnético es eléctrico y qué parte magnético. Llamaremos a es-

tos observadores FIDO, abreviatura de "Fiducial observers", es decir, observadores fiduciarios. Nosotros examinaremos la física de la vecindad del agujero desde su punto de vista. Una vez elegidos nuestros FIDO, podemos empezar a hablar de agujeros negros en lenguaje tridimensional corriente.

Para conferir al paradigma de la membrana la sencillez y potencia necesarias, los FIDO deben elegirse siguiendo reglas matemáticas estrictas. Se trata de normas bastante naturales cuando se traducen en palabras e imágenes. Cada FIDO debe permanecer a la misma distancia del agujero negro y a la misma latitud con respecto al eje de rotación del agujero. El FIDO posee también un estado de movimiento orbital específico: en un sentido muy especial, todos se encuentran en reposo en el espacio tridimensional.

¿Significa la expresión "en reposo" que cada FIDO, sea cual sea la distancia que le separa del agujero, está en reposo con respecto a las estrellas lejanas? No. Un campo gravitacional en rotación arrastra consigo el "espacio absoluto". El efecto, minúsculo cerca de la Tierra, resulta dramático en las proximidades de un agujero negro en rotación: el agujero arrastra el espacio y al FIDO con él, imprimiéndole un movimiento como si se tratara de una pelota de golf que girase en un jarabe espeso y arrastrara el jarabe circundante. Procediendo con la metáfora, los FIDO están en reposo en el jarabe (el espacio absoluto), pero el jarabe gira con respecto a las paredes de la cocina (las estrellas lejanas). Cerca del horizonte, los FIDO y el espacio en que habitan giran casi tan deprisa como el propio agujero (una vez cada 90 minutos en el

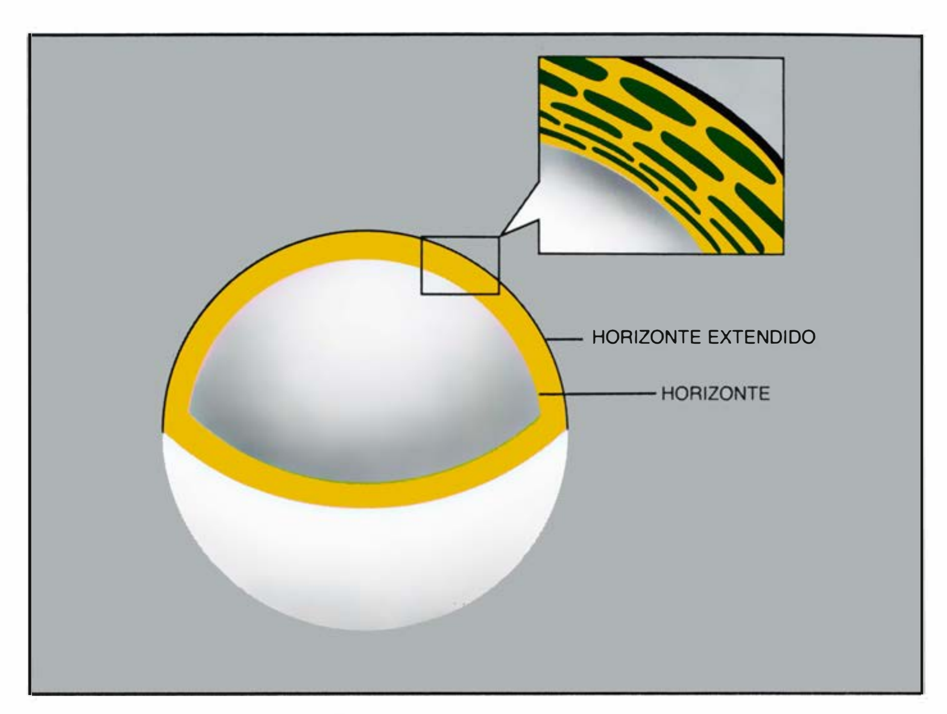


4. TIEMPO Y ESPACIO afectados por el horizonte de un agujero negro. En la parte superior, durante una hora de tiempo "universal" —el tiempo tal como se mide lejos del horizonte— se siguen los relojes pertenecientes a observadores situados a diferentes distancias del horizonte. Aunque inicialmente sincronizados (*1*), los relojes marcan tiempos distintos al cabo de la hora (*2*). A causa de la dilatación gravitacional del tiempo, cuanto más próximos se encuentren del horizonte, los relojes se retrasarán más en relación al tiempo universal; las manecillas del reloj situado junto al horizonte no han cambiado en absoluto. En la parte de abajo se indica el movimiento de observadores (*flechas*) situados a diferentes distancias de un agujero negro en rotación, tal como se vería desde lejos. Un observador fuera del horizonte da vueltas al agujero solidariamente con su rotación; los observadores más alejados orbitan más despacio. Cada observador se halla en reposo en el "espacio absoluto", pero el propio espacio se ve arrastrado por la rotación del agujero.

caso de un agujero negro de 100 millones de masas solares que gire deprisa); lejos del horizonte se hallan casi estacionarios con respecto a las estrellas lejanas.

El hablar de ritmos de rotación como hemos hecho aquí trae a la imaginación un patrón de tiempo universal. Mas, para un observador muy lejano, los relojes de los FIDO parecen ir a ritmos distintos. Cuanto más cerca del horizonte esté un FIDO, más despacio parecerá que corre su reloj. Podemos conseguir que los relojes de los FIDO se retrasen cuanto queramos con sólo acercarlos convenientemente al horizonte. Este fenómeno, llamado dilatación gravitacional del tiempo, ocurre también en el campo gravitatorio de la Tierra, pero allí es muy débil: una diferencia de una parte en mil millones entre el ritmo de un reloj situado sobre la Tierra y otro a bordo de un satélite geosíncrono.

El reloj de un FIDO da una hora que puede servir para describir la física en un punto. Para abordar con el paradigma de la membrana los procesos físicos de gran escala que involucran una región extensa del espacio, definimos una segunda clase de tiempo. Imaginamos, en cada punto, un reloj cuyo ritmo y tiempo inicial estén ajustados de manera que los relojes próximos al horizonte marquen el mismo tiempo que los relojes alejados, a pesar del intenso campo gravitatorio. Así preparados, estos relojes definen un tiempo "universal" que va al mismo ritmo en todas partes, como el tiempo de la física clásica y nuestra intuición (no relativista).



5. HORIZONTE EXTENDIDO. Se trata de una superficie imaginaria que se sitúa en el borde del verdadero horizonte del agujero negro; en el paradigma de la membrana, constituye el límite del agujero. El horizonte mismo no puede estudiarse con el paradigma porque ningún observador físico puede alojarse allí. Entre el horizonte extendido y el horizonte verdadero hay una acumulación de materia y de campos, resultado de la acreción del agujero desde su formación. En virtud de la dilatación gravitatoria del tiempo, la materia que se acerca al horizonte cae cada vez más lentamente (desde el punto de vista de un observador alejado) y nunca acaba de hundirse en el interior del agujero. Estos "sedimentos" quedan ocultos por el horizonte extendido.

Nuestra familia de FIDO se enfrenta a una grave contrariedad: ningún FIDO puede instalarse en el horizonte, ni en su interior. En el horizonte, el campo gravitacional es tan intenso que sólo los fotones, que se mueven a la velocidad de la luz, pueden recalar allí. Los FIDO, al ser observadores físicos, deben moverse más despacio que la luz. Si un FIDO se encontrara sobre el horizonte, o en su interior, caería hacia el centro del agujero. Su distancia al horizonte cambiaría necesariamente, quebrantando nuestras reglas de elección de los FIDO. Como no podemos colocar un FIDO sobre el horizonte, el espacio absoluto del paradigma de la membrana debe acabar justo antes de llegar al mismo.

Esta omisión resulta menos preocupante cuando se examina la física de la vecindad arbitraria del horizonte. Vistos desde lejos, los relojes físicos avanzan cada vez más despacio, a medida que se acercan al horizonte. En justa correspondencia, cada proceso físico se ralentiza allí hasta un ritmo infinitesimal. Por ejemplo, si dejamos caer una canica en el agujero y un FIDO alejado mide el tiempo de caída, observará que, al principio, la canica cae deprisa pero después se frena a medida que se acerca al horizonte. Se empotra contra el horizonte, moviéndose hacia dentro a un ritmo exponencialmente moribundo, aunque dando vueltas en torno al agujero solidariamente con la rotación del mismo.

Por el contrario, para un FIDO instalado cerca del horizonte, la canica que cae se aceleraría hasta una velocidad próxima a la de la luz y sufriría la "contracción de Lorentz-FitzGerald", que afecta a los objetos que se mueven a velocidades relativistas. El FIDO vería la canica comprimida hasta alcanzar una delgadez arbitraria cuando en su caída le pasara por delante. (Desde el punto de vista de un tercer observador que cayera dentro del agujero junto con la canica, ésta se hundiría a través del horizonte sin frenarse ni contraerse. ¡Tal es la peculiaridad del tiempo y el espacio en la relatividad general!)

Así, según el paradigma de la membrana basado en los FIDO, el horizonte está abarrotado de restos del pasado que se acumulan en capas de una finura infinitesima, como las capas sedimentarias del fondo del mar. Esta estructura estratificada, condenada a sumergirse exponencialmente cuanto más cerca se halla del horizonte, no ejerce ningún influjo en el resto del universo. Ideado para aportar una representación astrofísica, no supone ningún inconveniente mayor que el paradigma de la membrana se muestre incapaz de ofrecer imágenes intuitivas acerca de los procesos que se dan en el horizonte o en su interior. El paradigma de la membrana barre tales procesos debajo de la alfombra al construir un nuevo "horizonte extendido" por fuera mismo del horizonte verdadero e ignorando cualquier cosa que suceda en su interior.

Puestos a abandonar el estudio de la materia y los campos del interior del horizonte extendido, la influencia del agujero sobre su entorno debe expresarse en función de esta nueva superficie. En concreto, la interacción entre los campos eléctricos y magnéticos observados por los FIDO y el horizonte extendido debe reproducir el efecto del horizonte real sobre el campo electromagnético, un efecto que hemos deducido del antiguo paradigma del espacio-tiempo curvo. Definimos, pues, las propiedades del horizonte extendido del nuevo paradigma de manera que afecte a los campos medidos por los FIDO sin perder coherencia con las predicciones del espacio-tiempo curvo.

Znajek e, independientemente, Thi-

baut Damour de la Universidad de París demostraron en 1978 la similaridad existente entre las ecuaciones que describían el campo electromagnético en el horizonte y las que relacionaban los campos eléctricos y magnéticos en un material conductor. En el paradigma de la membrana nos apoyamos en ese parecido: el horizonte extendido se asimila a una membrana esférica o aplanada (si el agujero se halla en rotación) de material eléctricamente conductor.

Igual que cualquier otro conductor, esta membrana del horizonte extendido desarrolla una carga de superficie en respuesta a un campo eléctrico perpendicular y externo; se trata de la distribución y concentración de carga necesarias para eliminar las líneas de campo eléctrico perpendiculares y evitar que entren en su interior. Este apantallamiento se rige por la ley de Gauss, que establece que las líneas de campo eléctrico sólo pueden empezar y acabar en cargas eléctricas. La membrana genera también una corriente superficial para contrarrestar un campo magnético paralelo, de acuerdo con la ley de Ampère que relaciona los campos magnéticos con las corrientes eléctricas. En la membrana, la corriente superficial toma el valor necesario para proteger, del campo magnético paralelo, el interior de la membrana.

6. CARGAS Y CORRIENTES SUPERFICIALES que se desarrollan sobre el horizonte extendido en el paradigma de la membrana, análogas a las que se formarían sobre una membrana de material conductor. Igual que un verdadero conductor, la membrana produce cargas superficiales en respuesta a un campo eléctrico perpendicular; en el mismo orden, desarrolla una corriente superficial (*en color azul*) en respuesta a un campo magnético paralelo (*esquema superior*). La densidad de carga y la cantidad de corriente son las necesarias para proteger, de los campos externos, el interior de la membrana. Cuando las partículas cargadas caen hacia el agujero negro (*esquema inferior*), se representan como si se acumulasen en la membrana. La carga se conserva y se va distribuyendo sobre la membrana mediante las corrientes superficiales.

Vemos, pues, que la descripción que la relatividad general da del campo electromagnético en el horizonte se expresa de forma elegante y sencilla en función de las cargas y las corrientes de la membrana. Parte de la descripción se resuelve considerando que la membrana obedece la ley de conservación de la carga. Siempre que una carga eléctrica real, pensemos en la que llevan los electrones o los positrones, cae en el agujero, podemos trasladar el proceso a la membrana suponiendo que ésta incrementa su carga superficial en el momento en que la carga incide sobre el horizonte extendido. La carga se desplaza entonces de un sitio a otro de la membrana en forma de corrientes superficiales de la membrana. Desde este punto de vista, la carga no se crea ni se destruye. La suma de la carga real del entorno del agujero negro y la carga ficticia (pero que se intuye considerable), acumulada sobre la membrana, permanece constante.

Una segunda parte de la descripción consiste en otro planteamiento muy sencillo: una variante de la ley de Ohm, que relaciona las corrientes con los campos eléctricos que las producen. Casi todos los conductores ofrecen alguna resistencia al paso de la corriente; para una lámina delgada de conductor la resistencia se cuantifica mediante la resistividad superficial. Las matemáticas de la relatividad general, en el caso del paradigma de la membrana, determinan un valor preciso de la resistividad superficial de la membrana. Se cifra en 377 ohm, lo que indica que sería necesario un campo eléctrico de 377 volt por cada metro para producir una corriente de un ampère a través de cada unidad superficial del material de la membrana. Esta resistividad es bastante alta en comparación con la de una lámina de cobre, por poner un caso (una lámina de cobre de un milímetro de espesor tiene una resistividad superficial de 0,000018 ohm); posee, además, una significación especial: es la resistividad superficial de un absorbente perfecto de radiación electromagnética. La resistividad de 377 ohm constituye la manifestación, en el paradigma de la membrana, del flujo de la radiación, que sólo puede proceder hacia dentro del agujero y no hacia afuera.

En el contexto de la astrofísica, nuestro principal objetivo no es comprender la interacción entre agujero negro y radiación (campos electromagnéticos que oscilan rápidamente), sino averiguar la interacción entre el agujero y campos magnéticos de gran es-

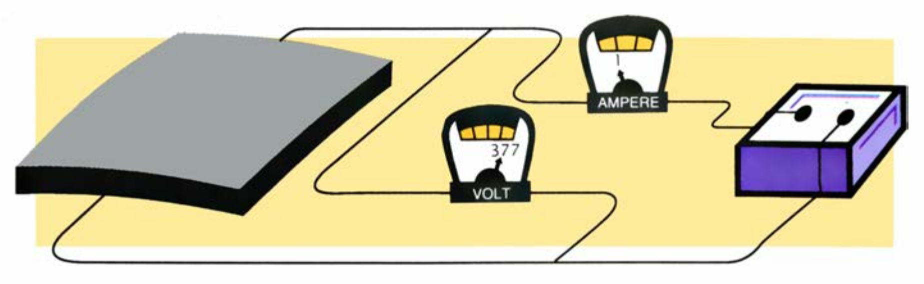
cala de variación bastante lenta. Para convencernos de que asimilar el agujero a una membrana conductora constituye una buena ayuda para imaginarnos tales interacciones, consideremos un problema teórico muy sencillo. Supongamos que tenemos un campo magnético intenso, como el existente entre los polos de un imán, en algún sitio de una galaxia alejadísima. Un agujero negro penetra en el intenso campo siguiendo una trayectoria perpendicular a las líneas del campo. ¿Cómo influirá el agujero en el campo y cómo afectará éste al movimiento del agujero?

El paradigma de la membrana sugiere que el agujero interaccionará con el campo de una manera muy parecida a como lo haría una membrana esferoidal de material conductor, de la misma circunferencia que el horizonte y una resistividad superficial de 377 ohm. Cuando una superficie conductora penetra en un campo magnético, según la teoría electromagnética, las corrientes superficiales que se inducen (bucles de corriente) generan una nueva componente del campo magnético, distorsionando, por tanto, las líneas de campo originales. Al mismo tiempo, el campo externo ejerce una fuerza sobre las corrientes inducidas que entorpece el paso del conductor.

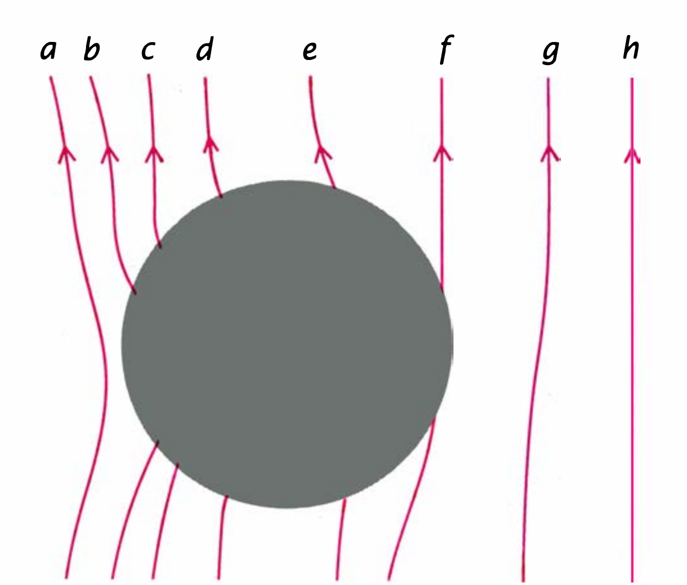
El paradigma de la membrana proporciona así una imagen en la que las líneas de campo sufren una ligera distorsión a su paso por las inmediaciones del horizonte extendido. Al propio tiempo, el agujero experimenta un modesto frenado cuyo valor exacto puede calcularse resolviendo las ecuaciones del paradigma de la membrana. Vale la pena poner de relieve que las matemáticas del paradigma del espaciotiempo curvo conducen a idéntico resultado. La ventaja del paradigma de la membrana estriba en que la imagen es directa e intuitiva: antes de hacer ningún cálculo da ya una idea de la naturaleza y la magnitud de la distorsión y del frenado.

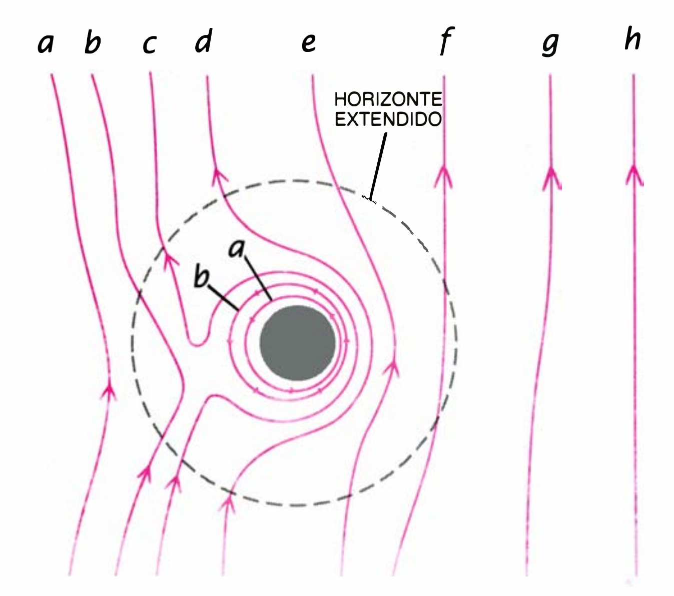
Lo hace, en parte, ocultando aspectos irrelevantes. Si dejamos de lado por un momento el punto de vista de la membrana y echamos una ojeada dentro del horizonte extendido, descubriremos que, en virtud de la dilatación gravitatoria del tiempo, las líneas de campo nunca cruzan el horizonte. Antes bien, se ciñen apretadamente en torno del agujero negro, hasta que por fin se desgajan y forman bucles cerrados que se hunden cada vez más acercándose al horizonte. Estas líneas densamente apretadas constituyen un ejemplo de los restos estratificados del pasado, cubiertos por el horizonte extendido. Desde la óptica de la astrofísica, sólo es de interés la distorsión débil de las líneas, y únicamente se aprecia fuera del horizonte extendido.

Vayamos ahora a la interacción, más compleja, entre un agujero negro en rotación y un campo magnético, capaz de suministrar energía a un cuásar. ¿En qué medida nos ayuda a entenderla el paradigma de la membrana? El paradigma pone de relieve que los agujeros negros no pueden mantener un campo magnético por sí mismos; sí pueden hacerlo, en cambio, las estrellas de neutrones magnetizadas que producen los púlsares. El flujo de corriente sin resistencia en el interior de una estrella de neutrones puede mantener un campo magnético casi indefinidamente; por contra, la elevada resistividad de la membrana del agujero negro daría lugar a que allí las corrientes equivalentes se disiparan en unos minutos, con lo que desaparecería el campo magnético. Para aportar el su-



7. LA MEMBRANA TIENE RESISTIVIDAD ELECTRICA, como casi todos los materiales conductores; el valor concreto señalado, 377 ohm, indica que serían necesarios 377 volt para producir una corriente de un ampère a través de la unidad superficial de membrana. Este valor relativamente alto es también la resistividad de un material capaz de absorber todas las señales electromagnéticas que incidieran sobre él. Así, el material de la membrana imita la capacidad del horizonte verdadero de absorber toda la radiación.



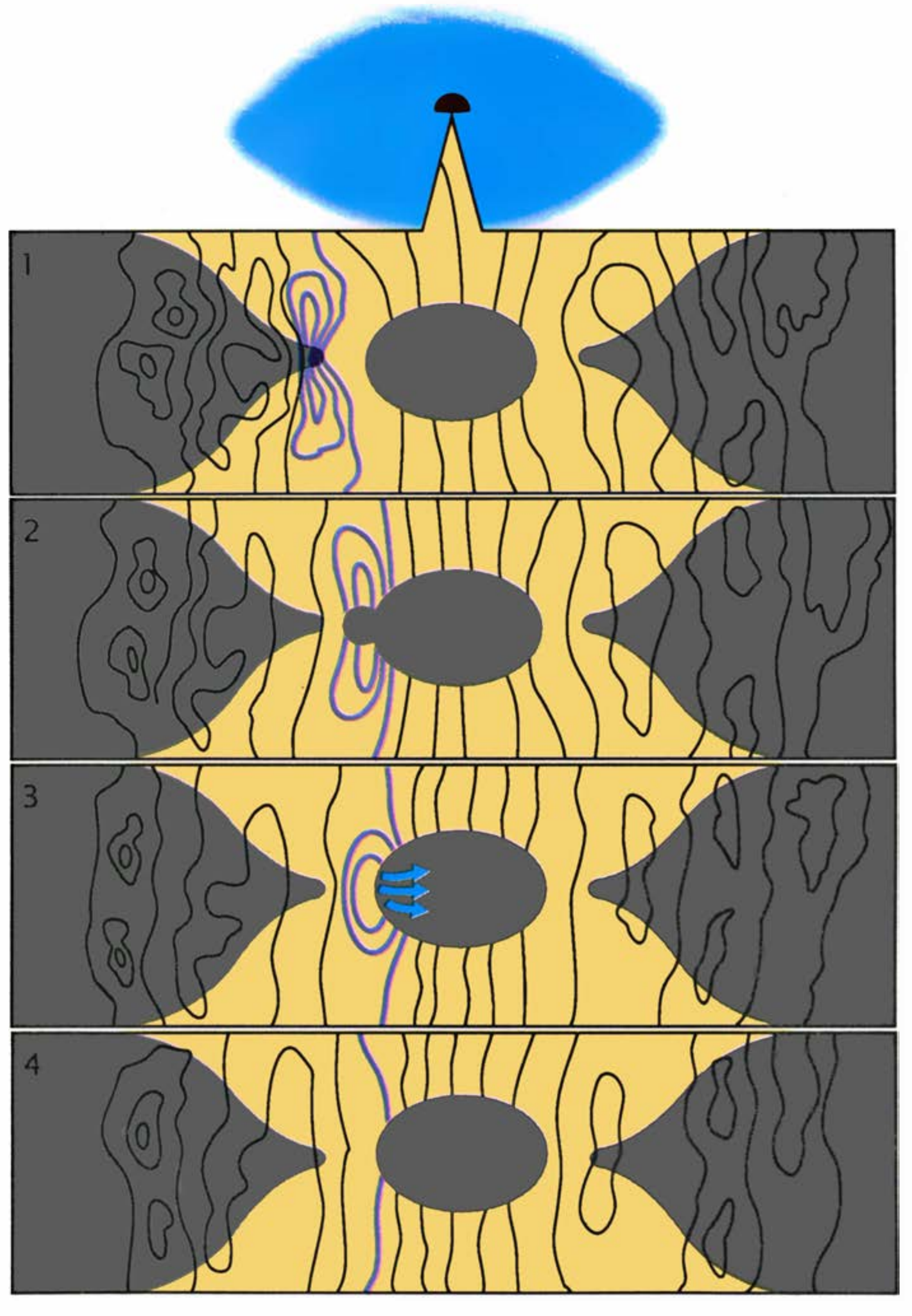


8. EXPERIMENTO IMAGINARIO en el que un agujero negro atraviesa un campo magnético intenso; el ensayo pone a prueba el paradigma de la membrana. De acuerdo con el mismo, el horizonte extendido actúa como una esfera conductora con una resistividad superficial de 377 ohm (*izquierda*). Las líneas de campo magnético que atravesaran esa esfera excitarían bucles de corriente y quedarían ligeramente distorsionadas; la propia esfera deceleraría algo. Una ojeada al interior del horizonte extendido (*derecha*) muestra que las líneas de campo no atraviesan el horizonte; se ciñen en su entorno y terminan por desprenderse formando bucles. Estas complejidades, ocultas bajo el horizonte extendido, no influyen en las interacciones astrofísicas del agujero negro.

ministro de energía a un cuásar, las líneas de campo magnético deberían ir enfilando el horizonte extendido durante toda la vida del cuásar.

Existe una fuente externa para un campo tal: el gas interestelar que el agujero va sumiendo. Todo gas interestelar alberga campos magnéticos, cuyas líneas de campo quedan congeladas en el gas cuando éste se calienta y se ioniza cerca del agujero. La rotación y la turbulencia en este plasma de acreción convierten las líneas de campo en una maraña caótica, con fragmentos de la misma que se depositan sobre el horizonte extendido por los grumos de plasma que caen. Los bucles de corriente que fluyen por la membrana disipan sin parar la energía del campo caótico, dejando líneas de campo ordenadas y "limpias" que penetran en la membrana por una región sur polar y salen de nuevo por una región equivalente a un polo norte. Una vez que se ha depositado una línea ordenada en el agujero, no puede ya disiparse; el plasma del disco de acreción y el campo magnético la mantienen mientras el agujero barra o trague el disco. El agujero adquiere así un campo magnético de unos 10.000 gauss (una intensidad más de 10.000 veces superior al campo magnético de la tierra).

¿Cómo gira este campo ordenado? Si la membrana fuera una estrella de neutrones y tuviera una resistividad eléctrica nula, las líneas de campo quedarían congeladas dentro de la membrana y se verían obligadas a dar vueltas a la misma velocidad. Si su resistividad fuera infinita, las líneas podrían penetrar libremente a través de la membrana, exentas de cualquier rotación. La resistividad real (377 ohm) sugiere que las líneas tenderán a girar junto con la membrana, aunque deslizándose un poco. Con esto, la imagen de la transferencia de energía de los púlsares se aplica también a los cuásares: las líneas, en rotación aunque se deslicen, actúan a modo de palancas para arrojar al exterior plasma, a grandes velocidades, transformando la rotación del agujero en un rápido flujo de gas sometido a expulsión externa.

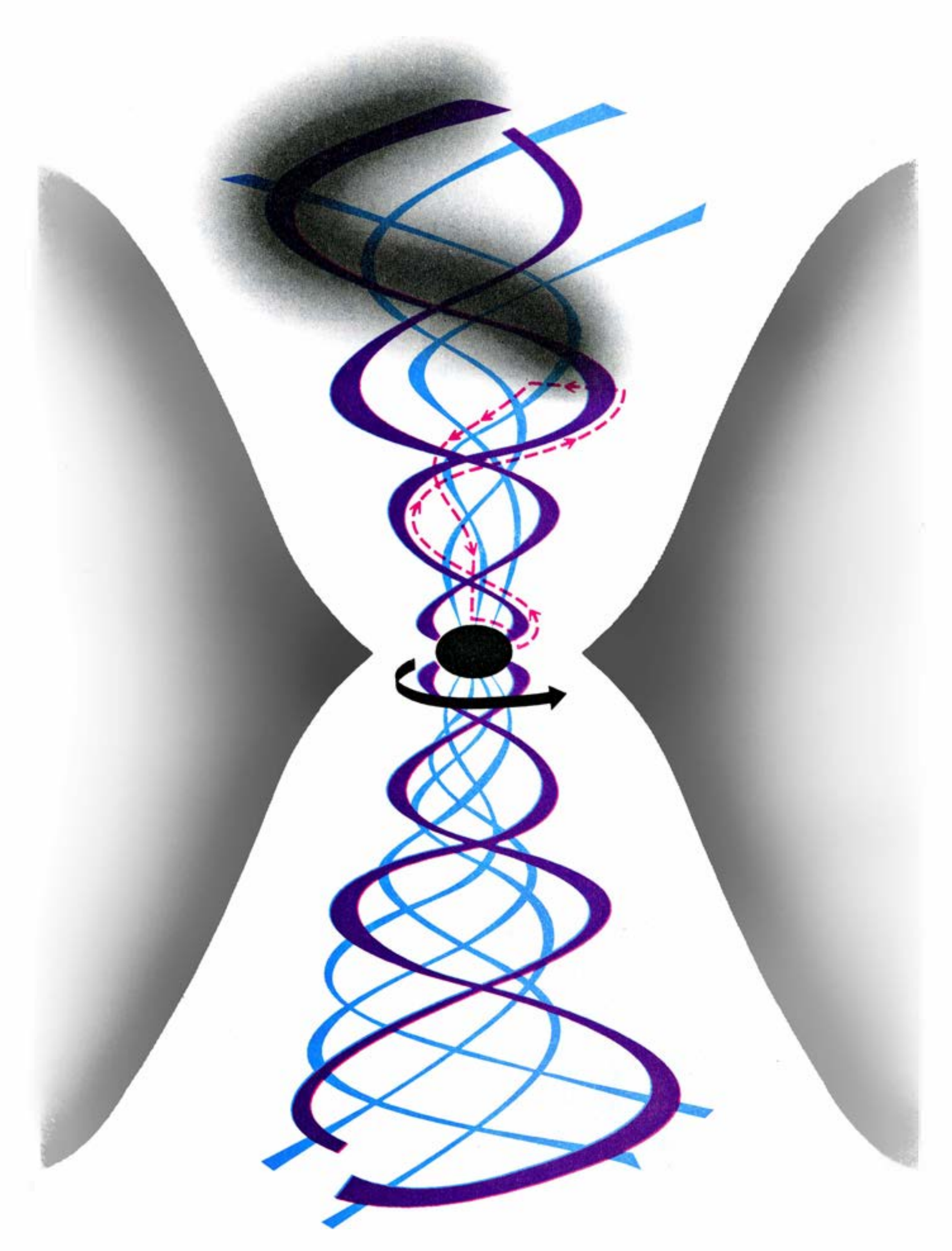


9. CAMPO MAGNETICO ORDENADO a punto de constituirse en el horizonte extendido de un agujero negro del centro de un cuásar. El agujero está rodeado por un disco de acreción, con forma de rosquilla, de gas caliente ionizado (*arriba*). Cuando un grumo de plasma del eje interior del disco es engullido dentro del horizonte extendido (*1, 2*), arrastra con él una maraña caótica de líneas de campo magnético (*color*). Cuando el campo caótico se hunde, provoca bucles de corriente (*flechas*) que disipan la energía de la maraña al fluir a través de la membrana altamente resistiva (*3*). Sólo sobrevive la línea ordenada que se extiende más allá del agujero, juntándose con otras líneas depositadas antes (*4*). (Ilustración elaborada por Javier Romero.)

El paradigma de la membrana sugiere un segundo camino, igualmente válido, para representar este mismo proceso de un modo que nos permite intuir la transferencia de energía cuantitativa y cualitativamente. El movimiento del campo magnético genera un campo eléctrico. En el caso de un agujero negro magnetizado en rápida rotación, el campo eléctrico creado en las proximidades del horizonte extendido puede producir una enorme diferencia de potencial entre los polos de la membrana y su región ecuatorial: hasta 10^{20} volt. Es como si el horizonte extendido fuera una enorme batería.

Las líneas de campo magnético llevan la corriente generada por la diferencia de potencial hasta regiones remotas del cuásar, conectando la membrana con su entorno en un gigantesco circuito de corriente continua. La carga positiva fluye, líneas de campo arriba, desde la región ecuatorial de la membrana, y lo hace en forma de un exceso de partículas negativamente cargadas que caen dentro del agujero. Fluye, de nuevo, otras líneas de campo abajo, hacia las regiones polares, y lo hace en forma de un exceso de partículas positivamente cargadas. La corriente fluye de las regiones polares a las ecuatoriales sobre el horizonte extendido, cerrando el circuito por un extremo. En el otro extremo, lejos del agujero, la corriente procede de las líneas de campo ecuatoriales a las polares, a través del plasma implicado.

La resistividad de esta región de carga alejada se parece, a buen seguro, a la de la membrana. Como ocurre en los



10. UN AGUJERO NEGRO EN ROTACION puede suministrar la energía de un cuásar haciendo girar las líneas de campo magnético que enhebran el horizonte extendido. El plasma congelado en las líneas de campo lejos del agujero las frena y tuerce el campo. El mecanismo en cuya virtud las líneas transfieren la energía rotacional del agujero al plasma distante puede compararse a un circuito gigante de corriente continua. El campo magnético giratorio induce una diferencia de potencial, enorme, entre los polos del horizonte extendido y el ecuador. La corriente (*color*) se dirige de los polos al ecuador y, de allí, hacia fuera, a lo largo de las líneas de campo hasta una gran distancia, donde cruza a las líneas de campo polares y retorna. Al cruzar, la corriente deposita su energía en el plasma interpuesto y lo acelera hacia fuera. Este mecanismo hipotético explicaría la luminosidad de los cuásares y los chorros de gas que salen a menudo de sus centros.

circuitos terrestres, tal "adaptación de impedancias" del generador y de la región de carga conduce a la máxima transferencia posible de energía. La mitad de la energía del circuito, más o menos, se deposita en el plasma distante; la otra mitad se disipa en forma de "pérdidas caloríficas" del horizonte extendido.

El resultado global es que el plasma de la región de carga se acelera hacia fuera, de acuerdo con los cálculos originales de Blandford y Znajek. A través de complejos procesos, que explica la física de plasmas, parte de la energía cinética del plasma puede transformarse entonces en la intensa radiación de un cuásar. El plasma acelerado puede también alimentar los chorros focalizados de gas ionizado que se ven salir de los núcleos de múltiples cuásares, que se propagan por el espacio muchos años luz [véase "Chorros cósmicos", por Roger D. Blandford, Mitchell C. Begelman y Martin J. Rees; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1982]. Es probable –aunque no seguro– que muchos cuásares obtengan así su energía. El paradigma de la membrana nos ha permitido imaginar algunos de los procesos que relacionan un agujero negro con el resto del universo.

Ciencia y sociedad

Avances en la asociación Rhizobium-*leguminosa*

En el mes de marzo de este año se celebró en Colonia un congreso dedicado la biología molecular de la nodulación y de la especificidad de las asociaciones *Rhizobium*-leguminosa, cuyos resultados sistematizamos en la siguiente nota. Sabido es que las bacterias del género *Rhizobium* invaden las raíces de plantas leguminosas e inducen la formación de nódulos. En la forma pleomórfica de éstos (bacteroide) fijan el nitrógeno atmosférico y lo hacen accesible a la planta.

La especificidad de la asociación entre *Rhizobium* y leguminosa sirvió de base para la clasificación del género. Cada especie bacteriana se asoció con un grupo de inoculación cruzada: *Rhizobium leguminosarum* nodula el guisante, la lenteja y el garbanzo; *R. meliloti*, la alfalfa; *R. trifolii*, el trébol, etcétera. La aplicación de las técnicas de biología molecular al género *Rhizobium* ha promovido un gran avance en el conocimiento de los mecanismos que rigen la nodulación y la especificidad de la asociación. Los genes responsables de la nodulación, genes *nod*, se localizaron en megaplásmidos, junto con los genes necesarios para la síntesis de la enzima nitrogenasa, genes *nif* y otros genes de la fijación del nitrógeno, genes *fix*.

Los genes *nod* se hallan en varios operones de las distintas especies de *Rhizobium*. En uno de ellos se encuentran los genes *nodA*, *nodB* y *nodC*, cuyos mutantes pierden la capacidad de nodular. Estos genes se han llamado *nod* comunes, porque sus mutantes pueden complementarse con genes pertenecientes a especies de *Rhizobium* de otros grupos de inoculación cruzada. Los productos de los genes *nodA* y *nodB* están implicados en la síntesis de un factor soluble, de 500 dalton de peso molecular, capaz de estimular la mitosis en cultivos de protoplastos. El producto de *nodC* es una proteína de membrana, homóloga de receptores de la superficie celular.

En la especie *Rhizobium leguminosarum*, dos genes más, *nodI* y *nodJ*, se alojan en ese operón. El primero determina una proteína homóloga de ATPasas bacterianas implicadas en el transporte activo; *nodJ* codifica una proteína muy hidrofóbica, localizada en el interior de la membrana plasmática. En algunas cepas de *R. leguminosarum* y *R. meliloti*, el gen *nodX* está situado en la proximidad de este operón. Este gen determina una proteína de membrana; cuando se transfiere a cepas de *R. leguminosarum* europeas, incapaces de nodular la variedad de guisante "Afghanistan", les confiere dicha capacidad. Otros genes *nod* se hallan implicados en el reconocimiento de la planta hospedadora, ya que sus mutaciones no se complementan con genes de otras especies de *Rhizobium*, pertenecientes a distintos grupos de inoculación cruzada. En *R. meliloti* se alojan, al menos, dos operones: *nodF* y *nodH*. La secuencia nucleotídica de *nodF* predice, para su producto, una homología con proteínas portadoras de grupos acilo de bacterias, plantas y animales.

El producto de *nodE* es homólogo de ribitol dehidrogenasas. Genes homólogos, aunque no complementarios, de *nodF* y *nodE*, existen también en *R. leguminosarum* y en *R. trifolii*. En estas especies se hallan, además, los genes *nodL*, *nodM* y *nodN*. En *R. trifolii*, *nodM* y *nodN* modifican la estructura química del polisacárido capsular (su pauta de acetilación) y alteran sus propiedades de unión específica a las lectinas de la superficie de la raíz.

La expresión de los operones considerados requiere la presencia de un gen



1. Nódulo de alfalfa inducido por Rhizobium meliloti. *Cortesía de Georges Truchet y Jacques Vasse, CNRS-INRA, Toulouse (Francia)*

nodD funcional. A diferencia de los demás genes *nod*, *nodD* se expresa, y su manifestación viene autorregulada por su propio producto. Para la activación de los operones *nod*, el producto de *nodD* reacciona con moléculas inductoras producidas por la planta (flavonas y compuestos afines) y posteriormente se une a la molécula de ADN, en la proximidad de los operones *nod*, donde hay una secuencia de unos 40 nucleótidos. Entre los productos de diferentes genes *nodD* pertenecientes a diversas especies de *Rhizobium*, existe una estrecha semejanza en la región amino terminal, mientras que la región carboxilo difiere bastante. Estudios con proteínas quiméricas muestran que la fracción carboxilo terminal es responsable de la interacción con las moléculas producidas por la planta. En este sentido, la interacción específica entre el producto de *nodD* y los diferentes flavonoides y exudados producidos por diversas plantas constituye un mecanismo de gran importancia en la activación de los genes *nod* y en la especificidad de la asociación. (E. Cervantes.)

Los violentos yanomamö

¿Qué tipo de sociedad es probable que se desarrolle en un entorno amable, aislado de la civilización? No hace mucho, los optimistas citarían a los "pacíficos Tasaday", habitantes de la pluviselva filipina, cuya mansedumbre llegaba al extremo de no tener, en su lengua, término equivalente de cólera. Desgraciadamente los Tasaday, "descubiertos" en 1971, son, sabemos ya, un engaño. Algunos antropólogos citan ahora un modelo menos atractivo: los yanomamö, una tribu de 15.000 miembros repartidos en unas 200 aldeas de Brasil y Venezuela, en lo más profundo de la selva amazónica.

Se les conoce principalmente por los escritos de Napoleon A. Chagnon, de la Universidad de California en Santa Bárbara, que los ha estudiado a lo largo de 24 años. En su libro *Yanomamö: The Fierce People*, publicado en 1968, describía un mundo potencialmente idílico, que brindaba caza y flora comestible en cantidad más que suficiente para alimentar a todos los pobladores. Sin embargo, los machos polígamos que dominaban las aldeas luchaban a menudo y con ensañamiento; parecían competir en ferocidad. La obra, y los escritos posteriores de Chagnon, ha sido saludada por los científicos (algunos de ellos hoy considerados sociobiólogos) que buscan una base genética de los comportamientos sociales. Los críticos acusaron a Chagnon de ignorar factores ambientales que podrían haber inducido a los yanomamö a la lucha y, por tanto, de implicar que la guerra resulta inevitable.

Chagnon, que ha convivido unos 50 meses con los yanomamö, ha reavivado la controversia en un artículo publicado en *Science*, donde presenta nuevos datos sobre la agresividad: el 30 por ciento de los varones muere violentamente y casi la mitad de los que cuentan 25 años de edad o más han participado en una matanza. Bajo esas acciones, estima, subyace una lógica brutal, de carácter darwiniano. Por medio de la violencia, los varones yanomamö parecen incrementar su éxito reproductor y el de sus parientes: mejoran su "eficacia biológica".

Las matanzas resultan de peleas en-



2. Guerreros yanomamö, armados de arcos y flechas, preparándose para una incursión contra otro poblado. Uno tras otro, antes de partir escenifican frente a los demás el daño que piensan infligir al enemigo. La fotografía la tomó Napoleón A. Chagnon

tre poblados por cuentas pendientes de antiguo, sin sentido aparente. Pero, señala Chagnon, las disputas siempre arrancan de la competencia por las "fuentes reproductoras", las mujeres. Los hombres de un poblado raptan las mujeres de otro, o dos hombres de un mismo asentamiento luchan por una mujer, a la que ambos desean. En este último caso, si uno de ellos muere, el poblado suele escindirse: los parientes próximos de la víctima lo abandonan y fundan otro nuevo. Para vengarse, los familiares varones del fallecido, armados de arcos y flechas, atacan el poblado original. El consecuente enfrentamiento para "vengar la sangre" puede durar años.

Chagnon sostiene que la venganza de la sangre resulta coherente en el contexto de la teoría de la selección por parentesco. El hombre que vengue inmediatamente la agresión de sus familiares, argumenta, puede crearse una reputación que desanime los ataques contra ellos y, por consiguiente, contra su poblado (que a menudo suelen ser lo mismo). Ese hombre gozaría de alta estima entre los hombres y mujeres de su lugar. En efecto, Chagnon ha comprobado recientemente (y afirma que el hallazgo le resultó también "sorprendente" a él mismo) que los hombres que han matado poseen, en promedio, dos veces y media más mujeres, y tres veces más niños, que los que no han matado. Es más, en las escaramuzas, la vida de los guerreros no parece correr un riesgo excepcionalmente alto. Los atacantes, relata Chagnon, suelen infiltrarse en la población, matan al primer par de personas que encuentran y salen huyendo. Es probable que tanto los guerreros atacantes como los del poblado agredido subsistan al golpe.

Chagnon opina que los guerreros yanomamö que alcanzan el triunfo no tienen por qué estar genéticamente más "predispuestos" a la agresión que los demás; puede que, sencillamente, aprendan mejor cómo valerse de medios violentos para alcanzar el éxito en su comunidad. (Chagnon afirma que se le ha acusado falsamente de proclamar la existencia de un "gen de la guerra".) Pero sugiere que el impulso procreador que se esconde tras la violencia de los yanomamö sí es innato y común a toda la humanidad. "Hay algo, afirma, de lo que nunca se hace acopio suficiente: sexo." Y propone que la observación atenta de otras sociedades tribales demostraría que la cultura yanomamö "no es atípica". En efecto, deduce que el vínculo entre el éxito reproductor y la violencia de las sociedades primitivas explicaría por qué "se valoran los éxitos militares y se asocian a una alta estima ... en muchas culturas, incluida la nuestra".

Marvin Harris, de la Universidad de Florida, es crítico declarado de los trabajos de Chagnon. En su opinión, que basa en otros estudios, los yanomamö están sometidos a tensiones ambientales; cuando crece la densidad de población, se ven obligados a invertir más energía en la recolección de alimento, especialmente en el caso de la carne. Sostiene que las incursiones constituyen una adaptación a esas tensiones, que sirven para controlar la población y, evitar así las carencias. Según Harris, detrás de las guerras, antiguas y modernas, se encuentra la competencia por los recursos materiales, no por los requerimientos reproductores. "La propuesta, que constituye el núcleo del paradigma de la sociobiología, de que todos los humanos se empeñan en tener el mayor número posible de hijos, afirma Harris, es errónea. A la gente le interesa más tener televisores que niños."

R. Brian Ferguson, de la Universidad de Rutgers, opina que "la intensidad de las luchas que describe Chagnon es muy poco usual. Cerca mismo de los yanomamö habitan otras tribus que no se enfrascan en nungún tipo de hostilidades". Ferguson argumenta que el amplio abanico de comportamientos de las sociedades primitivas demuestra que la naturaleza humana es mucho más "plástica" y sujeta a influencias ambientales de los que sugiere Chagnon.

Sin embargo, Ralph L. Holloway, de la Universidad de Columbia, mantiene que, ante el creciente volumen de investigaciones que relacionan la conducta con la genética, resulta ingenua la visión estrictamente ambiental de la guerra. Y observa, siendo él mismo antropólogo, que "la mayoría de los antropólogos sostiene la interpretación de que las posibilidades humanas no conocen límite. Pero no puede afirmarse sin más que todo es variación ambiental".

Así lo cree también Edward O. Wilson, de la Universidad de Harvard, considerado el padre de la sociobiología. Al contrario que Chagnon, al que le asusta la idea, Wilson planteó directamente la posibilidad de que la violencia humana posea un componente genético. "Me sorprende verdaderamente por qué la gente muestra tanto recato sobre el elemento humano de agresión, comenta. La humanidad camina sobre sangre desde que apareció. Si poseemos una fuerte predisposición biológica hacia la violencia, no podemos despreciarla sin más." Wilson sugiere que el hallazgo de Chagnon de un vínculo "potente y potencialmente selectivo" entre la agresión y el éxito reproductor podría representar un paso

importante hacia la comprensión y, posiblemente, la eliminación de la guerra.

Vacunas contra el paludismo

Las vacunas contra el paludismo elaboradas gracias a la aplicación de técnicas recientes de bioingeniería permiten redoblar las esperanzas de la lucha contra esa plaga tropical. Se ha logrado con ellas la inmunización de algunos voluntarios y, aunque las vacunas que ofrezcan protección total siguen constituyendo un objetivo a largo plazo, ese trabajo es el primer avance significativo realizado desde la década de 1940, cuando el DDT y la cloroquina se consideraron armas milagrosas. Sin embargo, los mosquitos portadores del paludismo y el parásito causante del mal desarrollaron resistencia a esas substancias. Entre 200 y 400 millones de personas sufren hoy paludismo, que mata anualmente a dos millones de seres humanos.

Durante su estancia en el hospedador humano, el parásito, *Plasmodium falciparum*, adopta distintos comportamientos, lo que entorpece la lucha que el sistema inmunitario libra contra él. Los esporozoitos del paludismo que el mosquito inyecta en el hombre invaden inmediatamente las células hepáticas. Ocho o 10 días después, cada una de ellas libera miles de merozoitos, que invaden los glóbulos rojos, siguen multiplicándose, los destruyen y provocan la subida de la fiebre. Algunos merozoitos se transformarán en gametocitos masculinos o femeninos. El mosquito ingiere los gametocitos, que en su organismo se reproducen sexualmente. En útimo término, una nueva generación de esporozoitos emigra hacia las glándulas salivales del insecto y el ciclo recomienza.

En cada una de las fases, el parásito presenta una cubierta de proteína distinta. La vacuna eficaz deberá instar la síntesis de anticuerpos contra al menos varias de ellas. Por desgracia, no se ha logrado cultivar el parásito, para obtener vacunas según los métodos tradicionales, pero la bioingeniería ha aportado la solución de esos obstáculos. El año pasado, Victor Nussenzweig y sus colegas, del Hospital Clínico de la Universidad de Nueva York, describieron en *Nature* los primeros ensayos en humanos de una vacuna elaborada a partir de un péptido (un fragmento de proteína) sintético. "Tomamos los aminoácidos necesarios y construimos una cadena de 12 aminoácidos que se encuentra en una proteína del esporozoito", explicaba Nussenzweig. La vacuna inmunizó a uno de los tres sujetos que recibieron la vacuna y retrasó la infección en los dos restantes. Otro equipo, del Centro Médico Walter Reed del Ejército de los Estados Unidos, informó de logros similares en ensayos de una vacuna fabricada por bacterias en cuyo ADN se había insertado el gen del péptido.

Los científicos están desarrollando también vacunas contra estadios más tardíos. Se ha incorporado a la vacuna de la Universidad de Nueva York péptidos que estimulan la producción, por parte de las células *T*, de interferón gamma, que ataca en la fase hepática. Un grupo dirigido por Manuel E. Patarroyo, de la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá, informó en *Nature* que, con vacunas sintéticas, se había inmunizado contra los merozoitos a tres de cada nueve voluntarios vacunados.

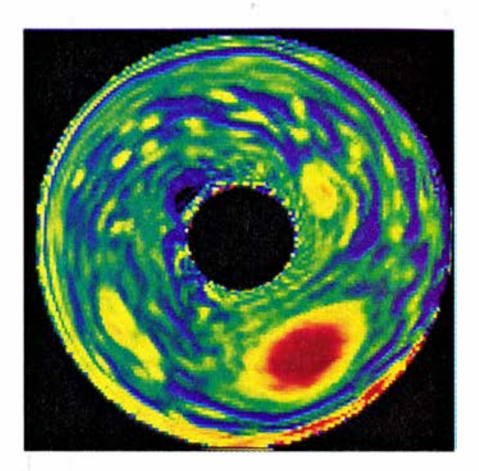
Louis H. Miller, del Instituto Nacional norteamericano de la Alergia y Enfermedades Infecciosas, advierte que dos aminoácidos de uno de los péptidos de la vacuna de Patarroyo difieren en una de las cuatro cepas del parásito que se han secuenciado. Puede que la vacuna no ofrezca protección frente a esas estirpes. Esos escollos subrayan más la necesidad de identificar péptidos vulnerables al ataque inmunológico y que no tiendan a variar. En palabras de Miller, "hay que encontrar el talón de Aquiles".

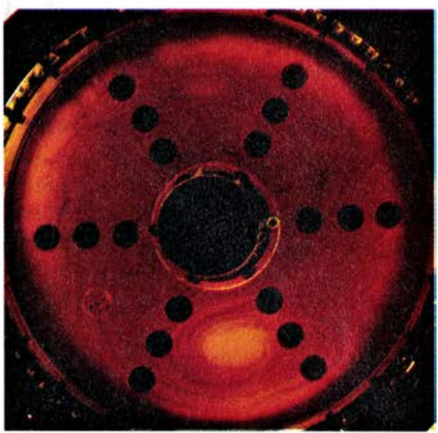
Confluencia de vientos

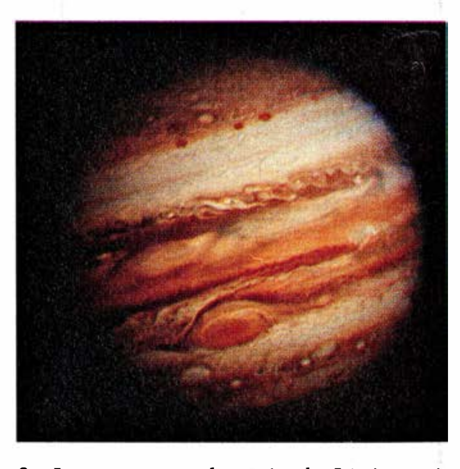
En 1664, Robert Hooke, de la Regia Sociedad Londinense, enfocó el telescopio hacia Júpiter y vio una mancha roja en su hemisferio meridional. A lo largo de los años ha sufrido dilataciones y restricciones, pero sigue estando ahí, sobresaliendo de una de las "zonas" latitudinales brillantes que rodean el planeta.

Los astrónomos creyeron en un tiempo que la mancha roja, cuyo diámetro duplica de lejos el de la Tierra, tenía que ver con una protuberancia o un hueco de la superficie del planeta. Se rechazó esa hipótesis cuando las sondas interplanetarias Voyager mostraron, a finales de la década de 1970, que Júpiter es líquido en casi su totalidad, salvo, quizás, un pequeño núcleo sólido. Las imágenes de los Voyager revelaron también que la mancha era un vórtice en rotación antihoraria, y que la zona que le acompañaba era sumamente turbulenta. En el margen septentrional de la zona, los vientos soplan hacia el oeste, y hacia el este en el meridional; entre ambos se arremolinan violentamente. ¿Cómo persiste la mancha en medio de ese caos?

Se describen en *Nature* dos simulaciones, una realizada en ordenador y la otra en un depósito de agua; ambas atribuyen la mancha a las potentes fuerzas de cizalladura que coinciden en la zona. "El atractivo de esos modelos, afirma Andrew P. Ingersoll, del Insti-







3. La gran mancha roja de Júpiter, simulada por ordenador en la Universidad de California en Berkeley (arriba) *y en un depósito de agua de la Universidad de Texas*

tuto de Tecnología de California, es que se basan en supuestos muy sencillos", y señala que las simulaciones anteriores, más complejas, no conseguían imitar tan bien la mancha.

Philip S. Marcus, de la Universidad de California en Berkeley, desarrolló un modelo de ordenador en el que la zona se observa desde el polo Sur de Júpiter. La zona se convierte allí en una suerte de banda circular donde los vientos soplan en sentido antihorario en su margen exterior (septentrional) y horario en el interior (meridional). Al incrementarse la potencia de los vientos, vio que en la región de cizalladura que se creaba entre ellos aparecían pequeños vórtices de rotación antihoraria.

Los vórtices tendían a fusionarse en otros mayores, hasta que se formaba un gran vórtice elíptico; movíase cual noria de cangilones agitada por los vientos que lo rodeaban. "Primero todo parece aleatorio y disparatado, dice Marcus, pero luego se genera algo coherente." Y hace notar que, cuando los Voyager sobrevolaron Júpiter, filmaron la formación de vórtices que se fundían en otros mayores, incluida la mancha roja.

Marcus logró convencer a sus colegas de la Universidad de Texas en Austin de que sometieran a prueba su modelo mediante una simulación física. Joël Sommeria, Steven D. Meyers y Harry L. Swinney construyeron un depósito circular de un metro de anchura dotado de un anillo interno de válvulas de entrada y otro externo de válvulas de salida. Pusieron luego el depósito en rotación, para simular las condiciones del planeta, a la vez que bombeaban agua por las válvulas. En virtud de ello, el agua del borde externo gira en sentido antihorario y, la que queda cerca del centro, en sentido horario. El agua de la zona de cizalladura turbulenta se comporta según predijo Marcus: los vórtices pequeños se funden en otros mayores hasta que se genera una gran estructura elíptica.

El éxito de la simulación nos sumerge en otro misterio. Marcus señala que en la atmósfera joviana abundan los vórtices grandes y las zonas de cizalladura que los crean, pero que ningún otro iguala el tamaño y la persistencia de la mancha roja. ¿Qué desencadena los potentes vientos latitudinales que circundan al planeta en sentidos opuestos y que crean las zonas de cizalladura que imprimen al planeta su aspecto bandeado? Marcus afirma que los vientos están asociados a la rápida rotación del planeta (que da una revolución cada 10 horas); nadie ha logrado, sin embargo, determinar el mecanismo preciso.



4. Embrión de Neusticosaurus, *reptil acuático que vivió hace unos 230 millones de años, estampado en un fragmento de esquisto*

Fósiles fetales

El registro fósil brinda escasos indicios del aspecto que ofrecían los reptiles primitivos, dinosaurios incluidos, cuando se encontraban aún en el seno materno o encerrados en huevos. Hasta la fecha, los únicos embriones conocidos correspondían a ictiosaurios, reptiles de aspecto delfinoide que desaparecieron hace unos 100 millones de años. Acaban de recuperarse ahora embriones bien conservados de otros dos reptiles extintos, de lugares y tiempos muy distintos.

Uno de los fósiles, encontrado en esquistos del sur de Suiza, es un ejemplar de unos cinco centímeros de un pequeño reptil acuático de hace 230 millones de años, del período Triásico. Se trata de *Neusticosaurus*, un reptil que alcanzaba los 30 centímetros de longitud y se impulsaba con la cola, larga y delgada, y con las extremidades, a modo de paletas, por las aguas cálidas y someras que cubrían a la sazón el sur de Europa.

El fósil es el menor de los 800 especímenes de *Neusticosaurus* que alberga el Instituto y Museo de Paleontología de la Universidad de Zurich. La abundancia de ejemplares explicaría por qué pasó inadvertido durante tanto tiempo el embrión fósil, descubierto en 1928; así opina P. Martin Sander, de dicha universidad, quien describe la muestra en *Science*. El corto tamaño del ejemplar, la cabeza, desproporcionadamente grande, y la presencia de huesos aún sin formar indican que se trata de un no nacido. La prueba más concluyente, destaca Sanders, es la posición del feto: prácticamente todos los demás neusticosaurios fósiles se han conservado panza abajo, "aplastados en el asfalto".

Según se cree, *Neusticosaurus* descendió de reptiles ovíparos terrestres. ¿Poseía ya la capacidad de alumbrar hijos vivos en el agua, como los ictiosaurios, o reptaba hasta tierra firme para poner los huevos, como sigue haciéndolo la tortuga moderna, descendiente también de criaturas terrestres. El fósil apareció en un depósito marino y no se encontraron trazas de cáscara de huevo en los alrededores, lo que sugiere que *Neusticosaurus* era vivíparo, mientras que la ausencia de ejemplares gestantes da a entender lo contrario. Según Sanders, la resolución del tema habrá de aguardar a ulteriores hallazgos.

Por el contrario, el embrión fósil descrito en *Nature* por John R. Horner, del Museo de las Montañas Rocosas, y David D. Weishampel, de la Universidad Johns Hopkins, apareció en un huevo. Horner halló la muestra hace cuatro años, en un yacimiento de Montana, mezclado con numerosos huevos y huesos de adulto. Sostiene, junto con Weishampel, que el fósil representa una especie hasta ahora desconocida de dinosaurio herbívoro del período Cretácico, hace unos 75 millones de años. Le han dado el nombre de *Orodromeus*, "corredor de montañas". Los adultos medían casi 2,5 metros de longitud y caminaban, erguidos, sobre sus largas y delgadas patas traseras.

Horner observó los huevos por tomografía axial computarizada y descubrió en uno de ellos un embrión intacto (los embriones de los huevos de dinosaurio suelen aparecer muy fragmentados). Con sumo cuidado fue retirando la cáscara hasta dejar el embrión al desnudo. Los huesos aparecieron "muy bien formados", señal, afirma, de que los juveniles de *Orodromeus* nacían relativamente bien desarrollados e independientes, como es el caso de muchos reptiles modernos.

Horner ha recuperado huevos con embriones de otros dinosaurios, entre ellos de un hadrosaurio, herbívoro bípedo de pico de pato que medía unos seis metros de longitud. Su primer análisis sugiere que esos retoños nacían subdesarrollados y precisaban importantes cuidados alimenticios, "como las aves", apostilla.

Reacciones químicas y haces moleculares

Los estudios llevados a cabo con cruces de haces moleculares e interacciones entre un láser y un haz permiten conocer mejor las reacciones químicas, la rotura de las moléculas y su formación

Angel González Ureña

La química estudia la materia y sus transformaciones. Conocer, pues, la velocidad del cambio químico, esto es, su dependencia del tiempo, resulta decisivo para la síntesis de nuevos materiales y el aprovechamiento de la energía que se genera en toda reacción. Si pudiéramos observar el movimiento de cada átomo durante el proceso de reacción entre dos o más moléculas, entenderíamos cabalmente cómo ocurre dicha reacción. Pero la técnica miscroscópica, que ha conseguido observar los átomos en una situación estática, se halla muy lejos de permitirnos verlos en movimiento. Afortunadamente, disponemos de una técnica alternativa: los ensayos con haces moleculares. Demos una breve reseña histórica antes de abordar sus fundamentos y aplicaciones.

Puesta a punto a principios de siglo, la técnica de haces moleculares consiste en el uso de átomos o moléculas, en forma de rayos, que se propagan, pues, a través de un medio enrarecido de muy baja presión, sin apenas colisiones entre sí o con el medio ambiente. Esta característica los convierte, lo veremos más adelante, en especialmente útiles para hacerlos chocar contra un gas, otro haz o una superficie, al objeto de estudiar los procesos físicos y químicos con gran resolución. Las aplicaciones de los haces moleculares a los procesos físicos, piénsese en la comprobación del espín electrónico o nuclear (el momento angular), y a los procesos químicos, por ejemplo la formación y detección de complejos o intermedios de las reacciones químicas elementales, han contribuido, por un lado, al desarrollo de nuestro conocimiento sobre la estructura atómica y molecular de la materia y, por otro, al desciframiento de los procesos químicos.

La formación de un rayo o haz molecular a partir de consideraciones puramente geométricas fue demostrada por Louis Dunoyer en 1911; creó un haz de átomos de sodio y logró su detección y posterior análisis. En esa etapa inicial que coincidió con las primeras décadas del siglo, las aplicaciones más importantes de los haces moleculares fueron las de tipo físico. Recordemos, así, el experimento de Otto Stern y W. Gerlach, en 1924, de descomposición de un haz de átomos de plata en dos al pasar aquél por un campo magnético; el experimento sirvió para corroborar el espín del electrón. El espín de una partícula se asimila al momento angular de giro sobre sí misma. Stern demostró igualmente que los rayos moleculares presentaban propiedades ondulatorias, de acuerdo con las predicciones de la física. Un discípulo de Stern, Isidor Isaac Rabi, logró medir con aparatos de haces moleculares más precisos los momentos magnéticos de los núcleos atómicos. (Stern y Rabi obtuvieron el premio Nobel de física en 1943 y 1944, respectivamente, por sus trabajos con haces moleculares.)

En el campo de la química, y en particular en el estudio de reacciones bimoleculares mediante el cruce de haces moleculares, cabe señalar un primer intento, no muy fructífero, realizado por Kroger en 1926. El primer experimento con éxito no llegaría hasta 1955: Taylor y Datz midieron la reacción del átomo de potasio con bromuro de hidrógeno para dar bromuro potásico más hidrógeno. Por último, a lo largo de la década de los sesenta se implantó ya la técnica de haces cruzados en distintas universidades europeas y norteamericanas para el estudio molecular de las reacciones químicas.

Se ha obtenido así una información valiosa, inaccesible por otros métodos, que se vio reconocida con la concesión del Nobel de química, en su edición de 1986, a tres investigadores del campo de los haces moleculares y la quimiluminiscencia. La revista se hizo eco en su día de sendas aplicaciones de tales haces: en la separación isotópica por láser ("La separación de isótopos con láser", por Richard N. Zare; Investigación y Ciencia, abril de 1977) y formación de gases sobreenfriados, formación de agregados de Van der Waals ("Espectroscopía de gases sobreenfriados", por Donald H. Levy; Investigación y Ciencia, abril de 1984).

Aquí nos ceñiremos a la técnica de haces moleculares y su contribución al estudio de la cinética y dinámica de las reacciones químicas, con especial énfasis en los trabajos realizados en nuestro laboratorio de química física de la Universidad Complutense de Madrid.

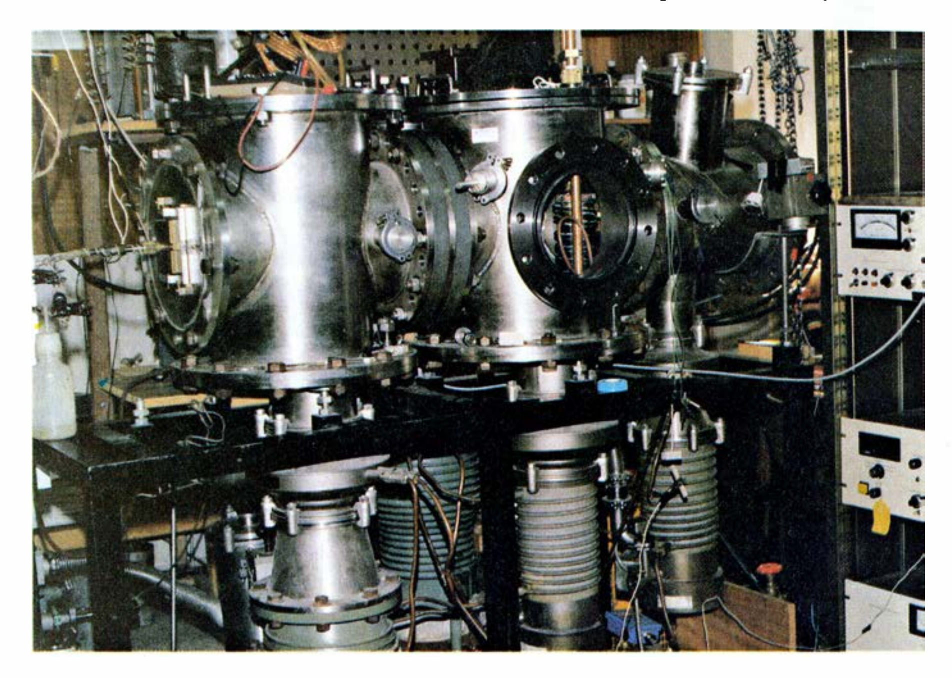
Algunas reacciones, aparte de la importancia intrínseca, comercial o de otro tipo que puedan tener, ofrecen aparentes paradojas; por ejemplo, si tenemos dos moléculas de agua, otras dos de nitrógeno y cinco de oxígeno, se nos formará espontáneamente ácido nítrico, con una disminución de la energía libre de Gibbs. (Esta magnitud, así llamada en honor de Josiah Willard Gibbs, representa la energía disponible; dicho de otra manera, el máximo trabajo útil que podría obtenerse a partir de la misma.) Si la variación de la energía libre de Gibbs es negativa, la reacción es espontánea; si es positiva, no se producirá de manera natural. Ahora bien, y volviendo a la paradoja, de acuerdo con este criterio la reacción anterior es espontánea, pues rinde −85 kilocalorías por mol, pero la experien-

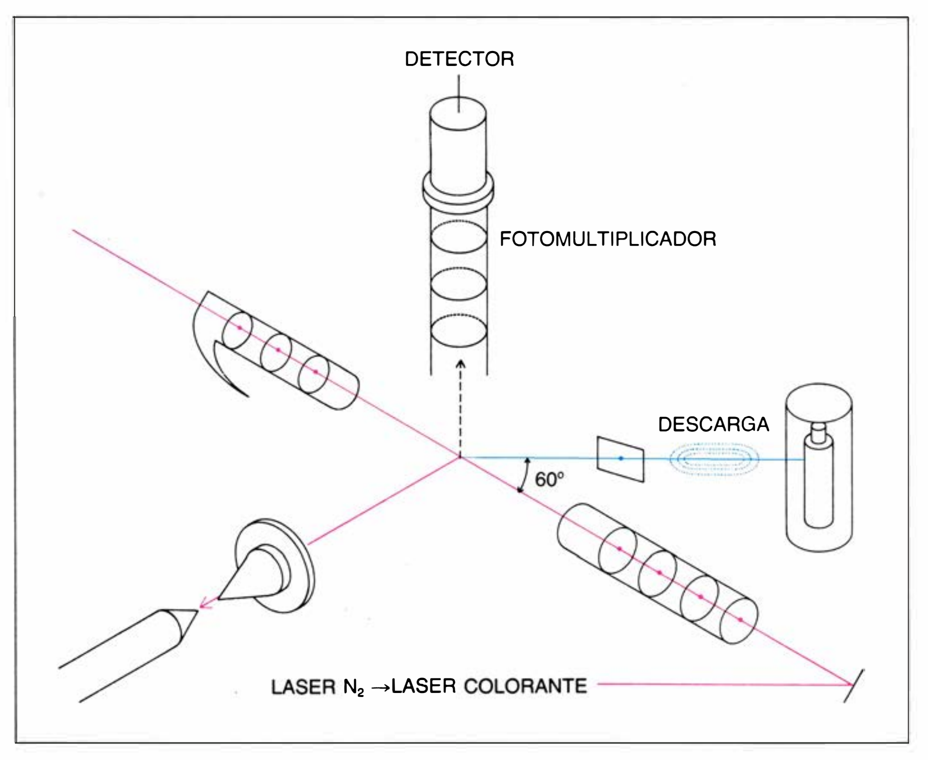
cia nos dice que en nuestra atmósfera no abunda el ácido nítrico, a pesar de darse agua, nitrógeno y oxígeno. La paradoja de la reacción se resuelve afirmando que la cinética de esta reacción es extraordinariamente lenta y, por tanto, imperceptible. Su mecanismo implica una gran energía de activación, es decir, hay que aumentar considerablemente la energía de las moléculas para que la reacción tenga lugar.

Pero, ¿a qué llamamos mecanismo de una reacción? En un sentido clásico designa el conjunto de pasos o colisiones entre especies químicas que tienen lugar simultánea o consecutivamente para producir la transformación global. El mecanismo no se pone de manifiesto con la mera estequiometría global de la reacción, esto es, con la exposición en lenguaje formal de las sustancias componentes, la dirección de la transformación y los productos resultantes. Por ejemplo, una reacción de apariencia tan sencilla como A + BC para dar AB + C podría ocurrir a través de varios mecanismos. Un mecanismo podría estar representado por una sola etapa o una única colisión: un acto químico. Nos hallaríamos, entonces, ante una reacción elemental, sin complejo intermedio, o quizá con él. Otro posible mecanismo podría introducir una etapa intermedia, o varias; de suerte que la reacción entre A + BC no produjese directamente AB + C, sino otros compuestos que, tras nuevas colisiones, ofrecieran, en última instancia, los resultados finales que dicta la estequiometría global. Esta, pues, nos omite los pormenores de la historia.

¿Hasta qué punto podemos conocer las reacciones que ocurren en una sola colisión o paso? Comencemos por reconocer la dificultad: no es fácil abordar, desde un punto de vista molecular, una reacción elemental, así se denominan las de un solo paso; dicho de otro modo, no es fácil obtener información detallada y microscópica del acto químico. Por la sencilla razón de que, al mezclar dos gases o líquidos, la reacción elemental ocurre enmascarada por billones de colisiones. Pero sí podemos provocar que las reacciones químicas se desarrollen choque a choque mediante una máquina de colisión única, esto es, una máquina de haces moleculares. Abordemos, pues, algunos aspectos fundamentales de la técnica de haces moleculares y la aplicación de la misma al estudio de las reacciones químicas.

Conocida la naturaleza de la reacción química elemental, conviene acotar el concepto de cruce de haces moleculares. Un ejemplo nos introducirá en su dominio. Nos dice la teoría cinética de los gases que, a una presión de millonésima de torr, el recorrido libre medio de una molécula de nitrógeno es de 70 metros. Esa longitud, que se abrevia con la letra griega lambda, representa, desde un punto de vista físico, la distancia media que recorre una molécula entre choque y choque. Podemos aprovechar esa propiedad del recorrido libre para formar rayos o ha-



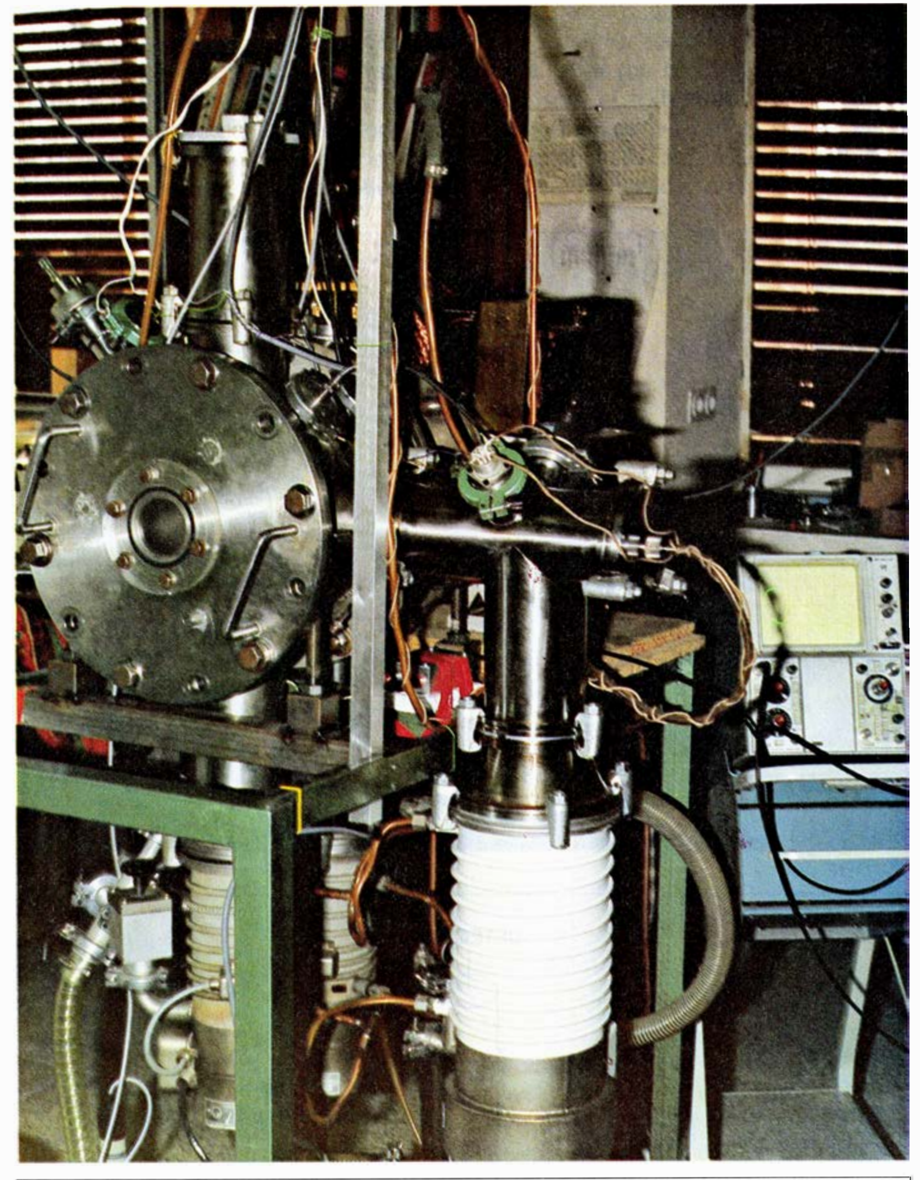


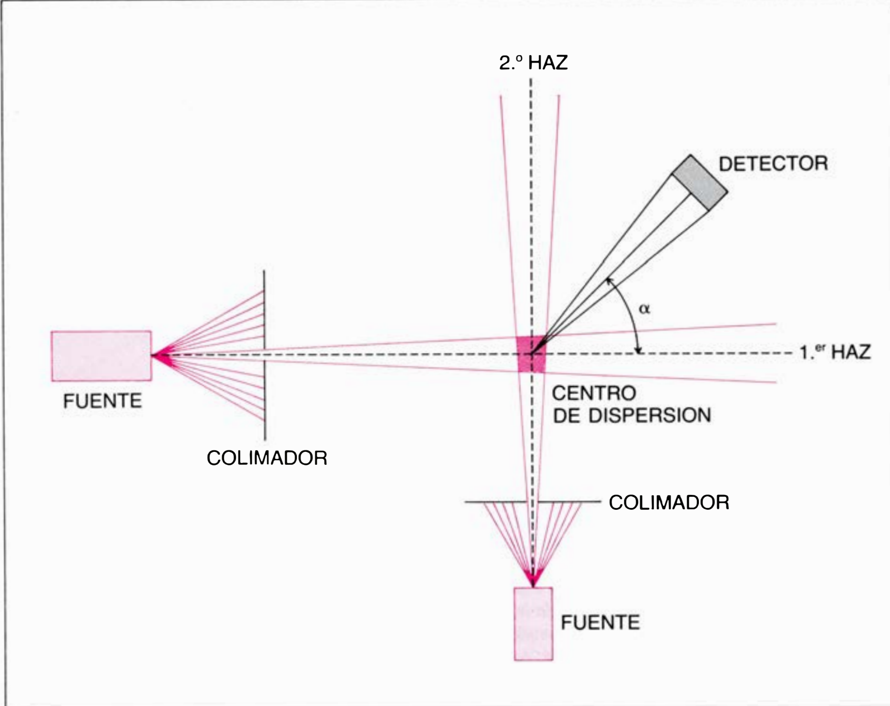
1. MAQUINA DE HACES MOLECULARES instalada en el laboratorio del autor en la Universidad Complutense de Madrid, donde se han llevado a cabo la mayoría de los experimentos descritos en este artículo (*fotografía superior*). Consta de varias cámaras de acero inoxidable, donde gracias a las bombas difusoras y rotatorias se logra un alto vacío para poder formar los haces atómico-moleculares. Mediante la expansión de los gases adecuados, así como el calentamiento de substancias, se forman los haces moleculares que se cruzan a noventa grados. La formación de especies químicas excitadas, susceptibles de emitir radiación, se logra mediante descargas eléctricas (*dibujo inferior*). Dicha radiación se detecta con ayuda del fotomultiplicador situado arriba en la dirección perpendicular a ambos haces. Estas señales son recogidas y procesadas por un ordenador para su posterior análisis. A la derecha, se aprecia la descarga eléctrica de un haz de calcio atómico. Cuando se forman productos en estados no excitados, que no emiten radiación alguna, se usa la excitación de su fluorescencia mediante un láser de colorante, bombeado por otro de nitrógeno.

ces moleculares dentro de máquinas donde se haya operado antes un gran vacío. Una vez colimados, los haces pueden dirigirse hacia objetivos seleccionables; verbigracia, cruzarse con otro haz.

Supongamos que pretendemos un cruce de haces. En ese caso, dadas las bajas presiones, las moléculas de los haces al cruzarse sufren sólo una colisión, o ninguna. El recorrido libre medio es inversamente proporcional a la densidad numérica (número de moléculas por unidad de volumen) y a la sección eficaz del choque (cuya descripción física equivaldría al tamaño medio que presentan las moléculas al choque). Unas condiciones típicas experimentales de cruce de haces moleculares pueden ser las que asignan a la densidad numérica un valor de 10^{13} moléculas por centímetro cúbico y, a la sección eficaz, un valor de 10^{-14} centímetros cuadrados. Si consideramos que la zona de colisión no suele tener más allá de unos pocos milímetros, digamos tres, las cifras anteriores arrojan para *lambda* el valor de 10 centímetros, lo que representa una probabilidad de choque entre dos moléculas de un 3 por ciento. La probabilidad de un choque doble no llega, pues, al uno por mil (0,0009). La probabilidad de que se produzcan choques es escasa y, en todo caso, serán simples o únicos, no múltiples. La técnica de haces permite acceder a los aspectos moleculares de tales reacciones de un solo choque.

La técnica nos faculta para medir la distribución angular de los productos. Es decir, tomando como dirección de referencia la de un haz, se emplea un detector móvil, situado en el plano de los haces, para determinar la cantidad de producto recién formado en la reacción que aparece dispersado en cada ángulo. Por detector móvil suele utilizarse un espectrómetro de masas, generalmente de tipo cuadrupolar, ya que su campo eléctrico está formado por cuatro polos. (Esa clase de detectores móviles fueron desarrollados, a



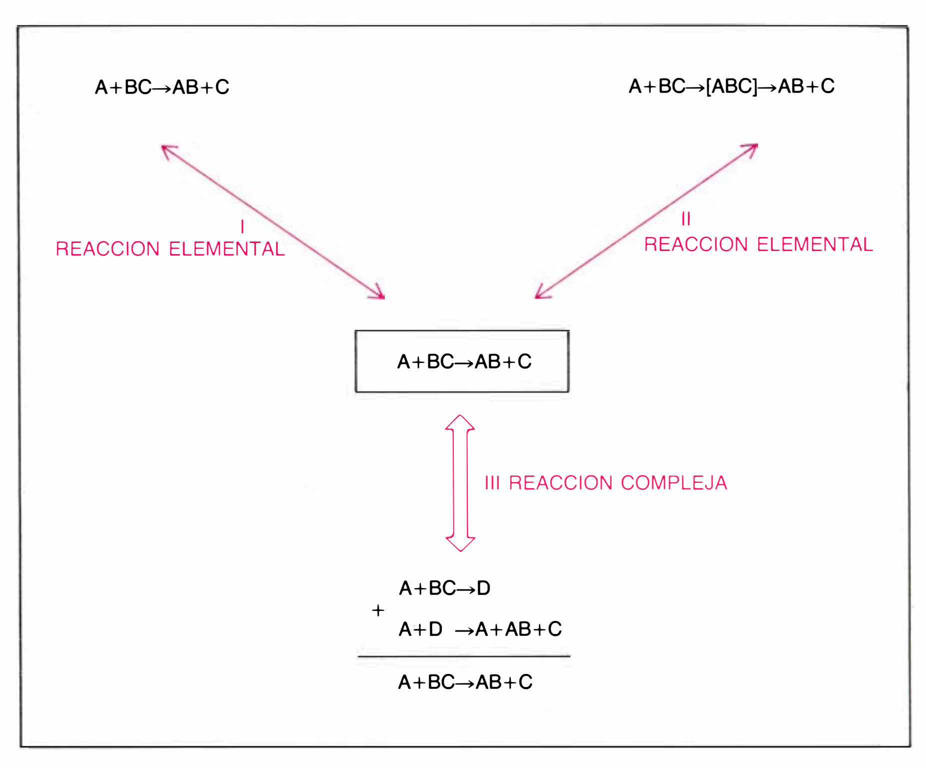


2. MAQUINA DE HACES MOLECULARES montada en el laboratorio del autor para estudiar reacciones químicas por ionizacion superficial, así como procesos de fotofragmentación. Consta de un horno de acero inoxidable que se calienta a alta temperatura, dentro de una cámara de alto vacío. Como se indica en el guión esquemático, dos haces se cruzan a noventa grados, de suerte que, en la zona de colisión, la probabilidad de un choque múltiple es muy pequeña. El detector móvil gira alrededor de la zona de cruce, lo que permite obtener la distribución angular de los productos de la reacción, y, con ello, información acerca de su mecanismo molecular.

finales de los sesenta, por Yuan Tseh Lee, de la Universidad de California en Berkeley.) El espectrómetro ioniza, por bombardeo electrónico, la sustancia de interés. Una vez formados los iones, se extraen, enfocan y analizan según su relación de carga a masa. Gracias al espectrómetro, se determinaba el producto de una reacción en cualquier ángulo y podía medirse, incluso, su velocidad. En este sentido, vale la pena entretenerse en describir algunos casos o ejemplos de mecanismos moleculares usando la técnica de haces moleculares.

Consideremos, pues, una reacción elemental o de un solo paso, así como el medio que nos permita introducirnos en su mecanismo: el cruce de haces moleculares. Supongamos, ahora, que, producida la colisión (por ejemplo, entre dos partículas A y B), se forma un complejo estable (verbigracia, AB), o un aducto, como suele llamarse. Esa especie viajará en la dirección y el sentido del centro de masas. Ahora bien, nos enseña la mecánica clásica que, si no intervienen fuerzas externas, la velocidad del centro de masas es constante e imperturbable. Por consiguiente, en el caso de la colisión que estamos considerando, la unión de A + B para dar el aducto AB, dicho complejo viajará en la dirección y el sentido del centro de masas. La distribución angular, es decir, el flujo de moléculas en función del ángulo de dispersión que se obtendría en este experimento de haces moleculares sería casi una línea, una distribución muy estrecha en torno a esa dirección. La primera distribución angular donde se sugirió la presencia de ese tipo de aductos se realizó en el laboratorio de Richard B. Bernstein, entonces en la Universidad de Texas en Austin y hoy en la de los Angeles. Cruzó haces de átomos alcalinos con agregados moleculares de moléculas orgánicas de tipo ioduro de metilo, obteniendo distribuciones muy estrechas del aducto formado en la colisión.

Pero no siempre se forma un aducto por efecto de la colisión. Supongamos que, tras el choque de dos partículas A y BC, se formase un complejo ABC que girase varias veces antes de romperse en fragmentos. En estas circunstancias, las partículas se comportarían como si perdieran la memoria de sus trayectorias iniciales; los fragmentos originados al descomponerse dicho complejo saldrían dispersados con la misma intensidad en todas direcciones. Dudley R. Herschbach, de la Universidad de Harvard, demostró en la década de los sesenta que, en estos casos, donde el complejo triatómico ABC de larga vida dura lo suficiente para girar bastantes veces, la distribución angular de los fragmentos presenta una simetría alrededor de cero y 180 grados, característica que sirve justamente para diagnosticar la presencia del complejo. ¿Qué ocurre si el choque es más rápido, hasta el punto de que el complejo apenas girase una vez? Veámoslo.



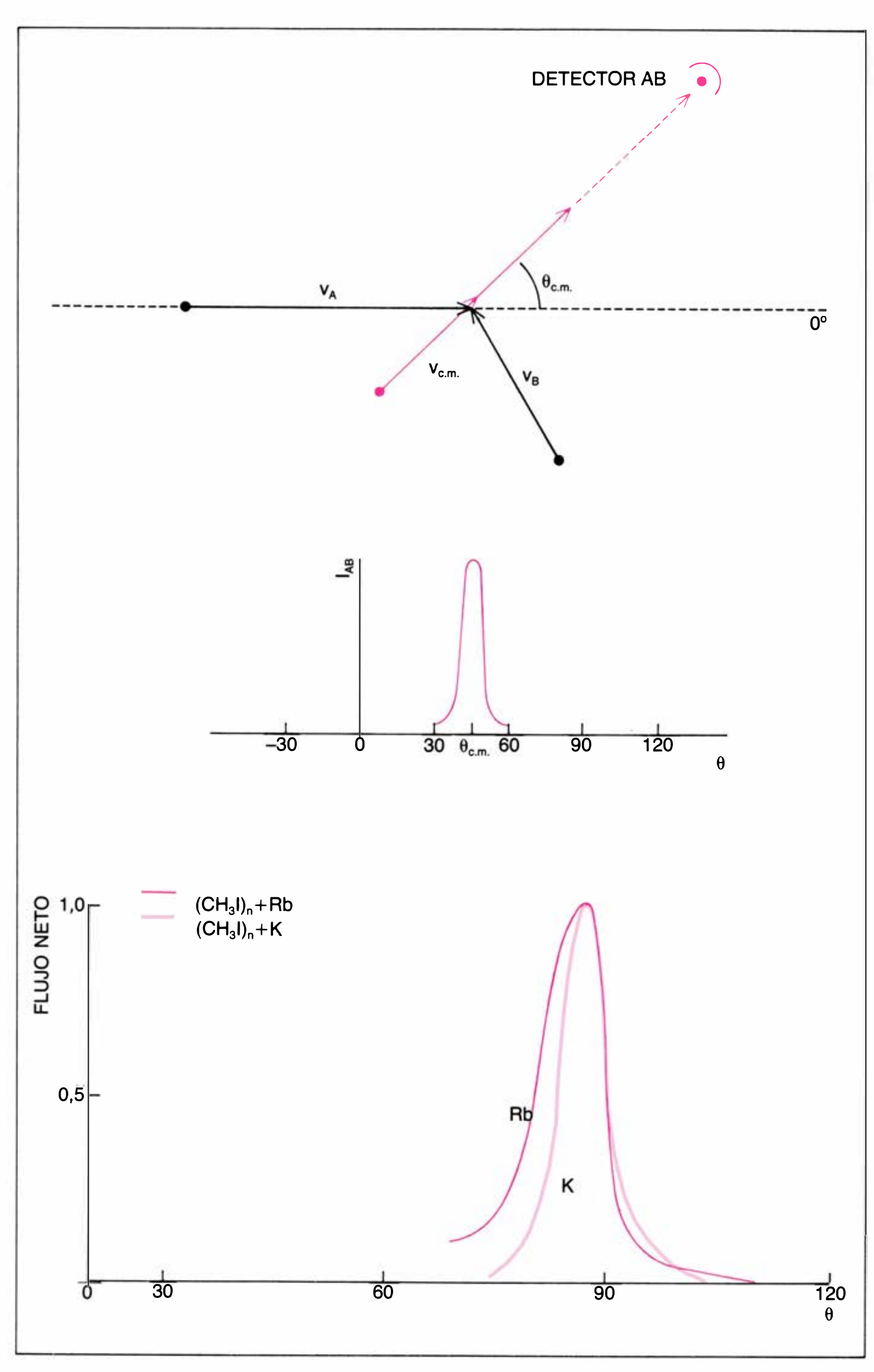
3. ESTEQUIOMETRIA Y MECANISMO de una reacción química. A partir de la estequiometría de la reacción (es decir, a partir de la cantidad global de reactivos que intervienen) no puede determinarse el mecanismo de la misma. La figura superior ilustra tres reacciones, dos elementales y una tercera compleja. Las elementales constan de una sola etapa y pueden presentar o no intermedio. La compleja comprende dos o más etapas para la misma estequiometría global aquí señalada, formándose D como intermedio.

Supongamos ahora que nuestro complejo triatómico (ABC) viviese bastante, aunque no llegara a durar una rotación entera. En esos complejos osculantes, así se llaman, la distribución angular no sería ya simétrica, sino más intensa en un extremo que en otro: más intensa a cero grados y menos a 180, pues el complejo no dura para dar una rotación completa. Ese descenso a 180 grados puede relacionarse con la vida del complejo osculante. Gracias a este método se demostró, por ejemplo, que las sales de talio formaban complejos que viven de 3 a 8 picosegundos.

Por último, veamos lo que ocurre cuando la colisión es lo suficientemente rápida y no da tiempo a formarse ni siquiera el complejo osculante. En estos casos, el choque reactivo entre A y BC sería instantáneo y los productos recién formados recordarían las trayectorias iniciales de los reactivos, mostrando ahora una dirección preferente en su camino de salida. Ello daría lugar a una distribución angular anisótropa. Estaríamos ante un mecanismo de los llamados directos, que se caracterizan por la ausencia de complejo y por un tiempo de reacción del orden de una vibración molecular.

El caso límite de los que venimos comentando sería aquel donde la molécula AB formada por el choque de A con BC llevase la misma dirección que la original de A. La dispersión, en ese ejemplo, aparecería hacia adelante, tal como ocurre con el ioduro potásico formado en la reacción de K + I_2. Es decir, el potasio, desde una gran distancia, arranca un átomo de iodo al otro que también forma la molécula, sin que ésta apenas se entere, continuando su camino hacia delante, con el átomo de iodo arrancado, prácticamente con la misma dirección que traía antes de chocar. Ese mecanismo despojante ("stripping") imita al observado en las reacciones nucleares en el sentido de que el efecto físico de la colisión reactiva es que el átomo de potasio despoja o desnuda un átomo de iodo del otro, que también forma la molécula diatómica, actuando este último como mero espectador en el acto químico.

Puede darse, sin embargo, el caso opuesto, donde la dispersión aparece hacia atrás. Este mecanismo de tipo "rebote" consiste en una gran aproximación del átomo atacante a la molécula con quien va a reaccionar. Es el caso de la colisión reactiva entre el potasio y el ioduro de metilo para formar ioduro potásico y radical metilo. Ahora, gracias a la aproximación del átomo de potasio al de iodo, del ioduro de metilo, la interacción, decimos, es de corta distancia, predominando las fuerzas repulsivas. Ello provoca que el ioduro potásico recién formado salga rebotado, dispersado hacia atrás, pues la dirección de cero grados corresponde, por convenio, a la del átomo atacante.



4. MECANISMO DE REACCION Y DISTRIBUCION ANGULAR de los productos, ejemplificado en la formación de un aducto por colisión de dos partículas. En el esquema superior se dibuja el diagrama vectorial de la formación de un aducto (complejo de muy larga vida), AB, por la colisión de las partículas A y B. El diagrama expresa las velocidades de las partículas A y B por separado, antes del choque, junto con la velocidad del centro de masas, que, como se señala, sería la dirección que tomaría la partícula aducto AB formada en el choque. Una distribución angular, es decir, una representación de la intensidad o flujo de partículas en función del ángulo de dispersión, nos daría, en este caso, una distribución muy estrecha (*centro*). La ilustración inferior representa la distribución real, experimental, de los aductos formados por el choque de haces de polímeros de ioduro de metilo tanto con átomos de potasio como de rubidio, cuyo centroide o dirección del centro de masas se aproxima, en estos casos, a noventa grados, dada la relación de masas.

En los ejemplos anteriores hemos estudiado la relación e interdependencia entre la distribución angular de los productos y el mecanismo molecular de la reacción. Para completar nuestra descripción es importante resaltar que la energía desempeña también un papel decisivo en la cinética y la dinámica de la reacción química.

¿Qué relación hay entre el mecanismo molecular y la energía y reacción química? Desde el siglo pasado, y gracias sobre todo a los trabajos del químico sueco Svante A. Arrhenius, sabemos que la temperatura es un factor decisivo para aumentar la velocidad de muchas reacciones químicas. La ley que en su honor lleva su nombre expresa la constante cinética, k, de una reacción en función de la temperatura, T, mediante una relación de tipo exponencial. Si bien durante muchos años el único medio para cambiar la energía de las moléculas era el térmico, modificando la temperatura de la mezcla, en la actualidad se ha alcanzado una gran selectividad para poder cambiar la energía translacional sin apenas variar la energía vibracional, rotacional o electrónica, y viceversa, de los reactivos. (Por energía translacional de las moléculas debemos entender la energía cinética de movimiento; por energía vibracional, la energía con que vibran los átomos enlazados, que forman parte de una molécula.)

En nuestro laboratorio de la Universidad Complutense de Madrid hemos venido estudiando la influencia de la energía translacional en la consecución de la reacción química, con el objeto de determinar la energía umbral de la misma, es decir, la energía de colisión a partir de la cual se forman los productos. Nos servimos de una técnica de aceleramiento para variar la velocidad de las moléculas. En líneas generales, dicho método consiste en expandir, a través de un agujero muy pequeño ("nozzle"), una mezcla de un componente ligero, hidrógeno, al 99 por ciento, con otro pesado, ioduro de metilo al 1 por ciento. Debido a la gran presión reinante en el horno, las moléculas pasan por el orificio de expansión y zonas limítrofes experimentando múltiples choques, gracias a los cuales el componente pesado adquiere la velocidad del ligero, por transferencia de momento. El efecto físico y neto de

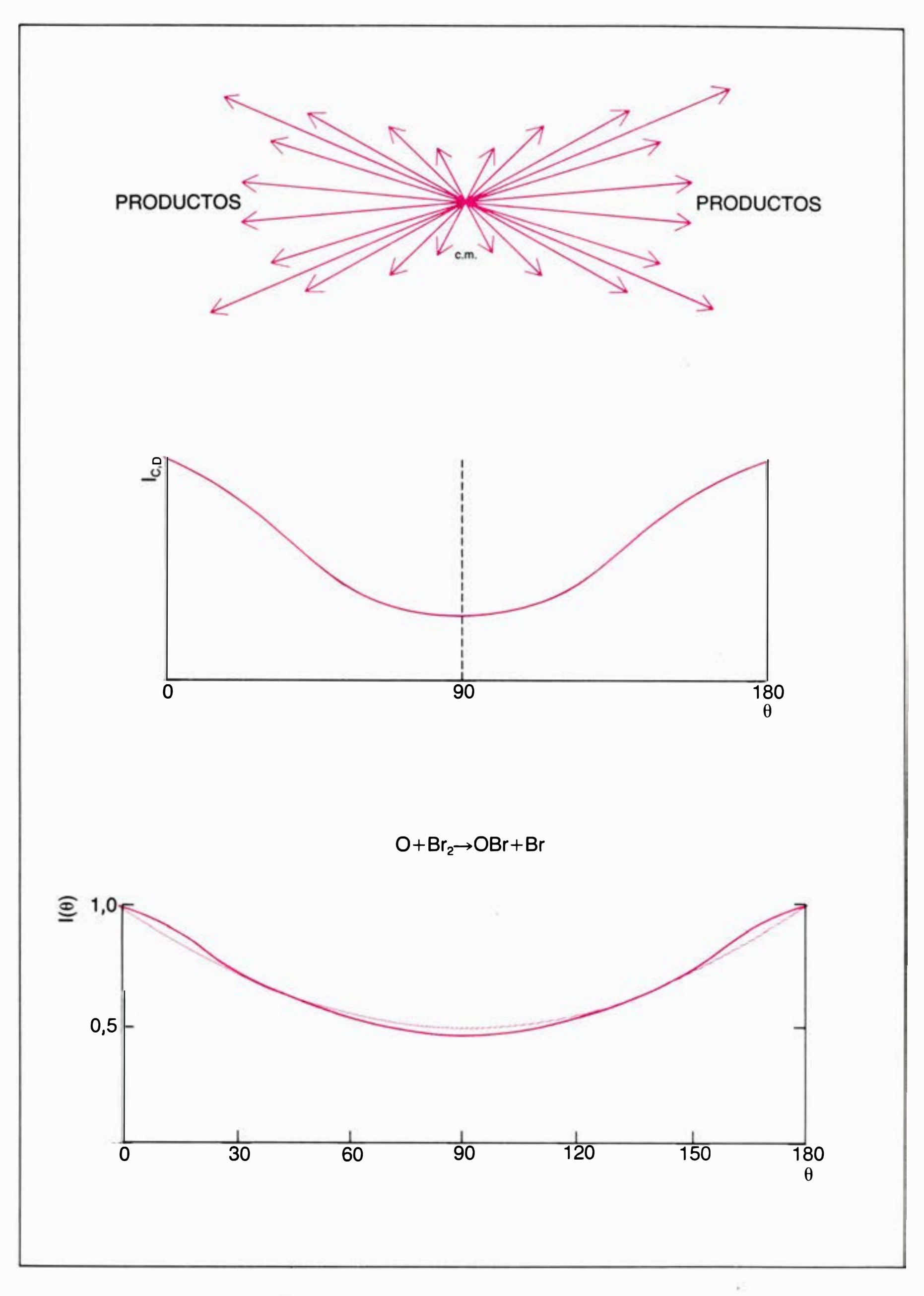
esta expansión hidrodinámica es que el gas pesado aumenta su energía tanto más cuanto mayor sea la fracción molar del componente ligero, formándose haces de velocidades incluso superiores a la del sonido.

Gracias a esta técnica pueden provocarse colisiones reactivas donde experimentalmente, y de manera progresiva, se va variando la velocidad relativa de choque. Eso nos ha permitido medir la variación de la sección eficaz reactiva, es decir, el tamaño medio reactivo, en función de la energía de colisión; ese parámetro se denomina función de excitación, y se simboliza por $\sigma_R (E_T)$.

Uno de los mecanismos mejor aceptados para este tipo de reacciones es el de transferencia electrónica, produciendo como etapa previa un intermedio iónico. Volviendo a la reacción del comienzo, de A + BC que daba lugar como productos finales AB + C, el intermedio iónico en cuestión sería, por ejemplo, A^+ ... BC^-. El primer caso podría ser una transición vertical gracias a la cual el estado de la molécula BC cambia, tras la captura electrónica, del estado fundamental al estado repulsivo, no enlazante, del anión BC^-. Si aceptamos este mecanismo, el salto electrónico y posterior disociación de BC, y dado que la reacción tiene lugar con BC en su estado fundamental vibracional, la energía umbral vendría determinada, necesariamente, por la diferencia de potenciales desde el punto de cruce del potencial del anión hasta el estado fundamental vibracional de la molécula BC.

Afortunadamente esta diferencia de potenciales puede estimarse para muchas reacciones de álcalis con haluros de alquilo, sin tener que recurrir a ninguna clase de cálculo adicional; en efecto, por espectroscopia se conocen los potenciales de las moléculas neutras tipo BC y, por captura electrónica, los potenciales iónicos. Los valores que hemos obtenido para la energía umbral de la reacción de potasio y bromuro de metilo, por ejemplo, daba 0,12 electronvolt, al medirse experimentalmente, mientras que el cálculo por el método espectroscópico anteriormente citado arrojaba el valor de 0,10 electronvolt.

En la dinámica de las reacciones químicas interviene de una manera destacada el grupo radical. Por tal se entiende el grupo orgánico formado por átomos de carbono e hidrógeno que van unidos a los átomos de halógeno en las

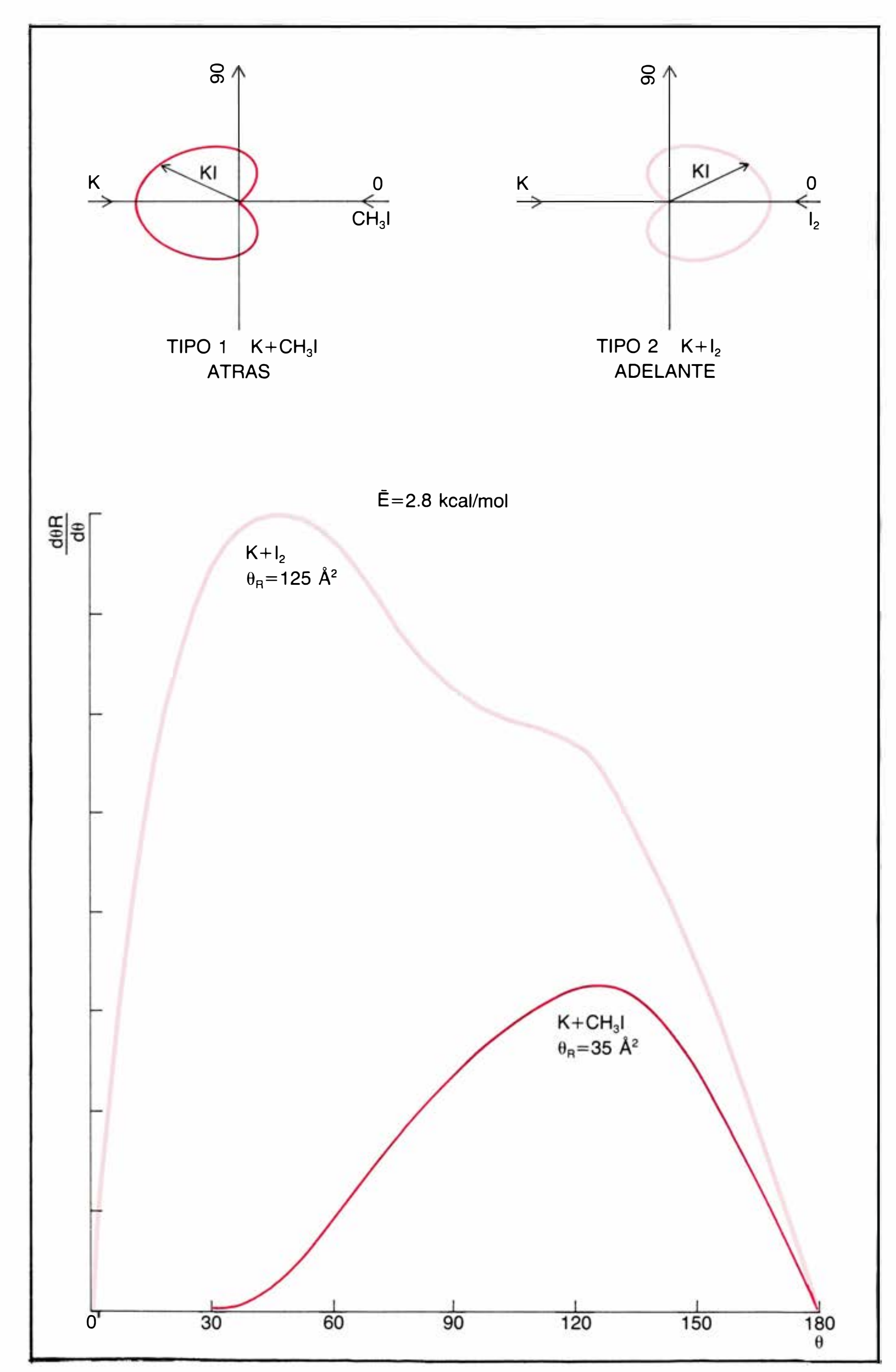


5. MECANISMO DE REACCION Y DISTRIBUCION ANGULAR de los productos, ejemplificado en la formación de un complejo de larga vida. El esquema superior ilustra la distribución vectorial de los productos en todas direcciones formados en la colisión. En el del centro se ofrece la distribución angular correspondiente. Si el complejo vive mucho más que una rotación, la distribución angular muestra esa simetría a 0 y a 180 grados. Abajo se da un ejemplo de complejo de larga vida formado en la colisión entre oxígeno y bromo molecular, para rendir dióxido de bromo y bromo atómico, donde la distribución angular detectada corresponde al óxido de bromo. En las abscisas se indica el ángulo de dispersión con que sale el fragmento producto; en ordenadas, la intensidad de producto observado. La curva a trazos corresponde a un cálculo teórico basado en una teoría estadística sobre la formación de esos complejos. El acuerdo entre teoría y experimento confirma la larga vida, de más de una rotación, del complejo colisional, formado en el proceso.

substancias que estamos estudiando. En ese contexto hemos investigado en nuestro laboratorio las reacciones del ataque del átomo de potasio con los distintos yoduros de metilo, etilo y propilo. En un experimento llevado a cabo a 17 kilojoule por mol de energía de colisión para todos los sistemas, se encontró que la reactividad disminuía a medida que aumentaba el tamaño del grupo radical. Los valores encontrados del tamaño medio reactivo fueron 39, 30 y 20 angstrom al cuadrado, para la reacción de metilo, etilo y propilo, respectivamente.

Veíase, pues, que, a medida que aumentaba el tamaño del grupo radical, el ataque del átomo de álcali se tornaba cada vez más difícil, como si la colisión reactiva quedara confinada en la configuración lineal. En ese estudio analizamos también la fracción de la energía

total que aparecía en energía translacional de los reactivos con el propósito de dilucidar cómo y hacia dónde se liberaba la energía desprendida en estas reacciones exotérmicas. Observamos que, conforme crecía el grupo radical, mayor era la fracción de la energía total, liberada en la reacción exotérmica, que aparecía en forma de energía interna de los productos; dicho de otra manera: mayor era la fracción de energía interna que presentaba el grupo radical. Ello nos indujo a concluir que el aumento de la complejidad de las moléculas reaccionantes, esto es, del grupo radical, comportaba el incremento de energía alojada en los modos vibracionales de ese grupo; la parte que queda para la traslación disminuye, pues, en ese mismo orden.



6. MECANISMO DE REACCION Y DISTRIBUCION ANGULAR de los productos, ejemplificado en un mecanismo directo de distribución angular de la formación de ioduro potásico. Las dos figuras superiores muestran dicha distribución mediante sendos mecanismos directos: a la izquierda, del tipo hacia atrás; a la derecha, del tipo hacia adelante. Ambas figuras representan sendas distribuciones polares donde la distancia de la línea gruesa al centro constituye una medida proporcional a la intensidad de ioduro potásico. Nótese que, aun tratándose del mismo producto, la distribución angular es completamente distinta en ambos casos. La ilustración inferior señala, en ordenadas, la intensidad del producto detectado y, en abscisas, el ángulo de dispersión. Ambas distribuciones ponen de manifiesto el carácter directo del mecanismo, debido a su anisotropía, es decir, a la existencia de direcciones o ángulos privilegiados en la dispersión. De ahí la ausencia del complejo colisional. El mecanismo se dice que es de tipo directo porque ni siquiera dura una rotación.

En todos los ejemplos citados anteriormente, tanto los reactivos como los productos se han preparado o detectado por métodos no espectroscópicos, es decir, no se usaba la radiación electromagnética para la formación de reactivos o detección de productos. Hay, sin embargo, múltiples ejemplos de reacciones químicas donde cabe el uso de métodos espectroscópicos para tal fin. En el resto de este artículo expondremos algunos ejemplos de este tipo de reacciones con especies excitadas. Nos limitaremos a la quimiluminiscencia y a la fluorescencia inducida por láser.

Entendemos por quimiluminiscencia la emisión de radiación por parte de los productos de una reacción exotérmica. En condiciones normales, la manifestación macroscópica de una reacción exotérmica es el calentamiento, la elevación de la temperatura de la vasija o recipiente donde se lleva a cabo el proceso. Si la reacción tiene lugar en un medio de baja presión puede observarse la emisión correspondiente. En esta técnica, desarrollada por John Charles Polanyi, de la Universidad de Toronto, los átomos producidos por algún tipo de descarga se mezclan con moléculas para provocar la reacción química. Se trata de un esquema de colisión única, pero sin la resolución obtenida en un aparato de haces moleculares. En razón de la baja presión, las moléculas excitadas vibracionalmente no se relajan por colisión entre ellas o con la pared y emiten fotones. Un montaje óptico adecuado, que opere con espejos y otros elementos necesarios, permite al espectrógrafo cuantificar y analizar la emisión quimiluminiscente producida en la reacción. Lo que constituye un buen medio de información sobre las fuerzas involucradas en la ruptura y formación de los enlaces químicos de las moléculas.

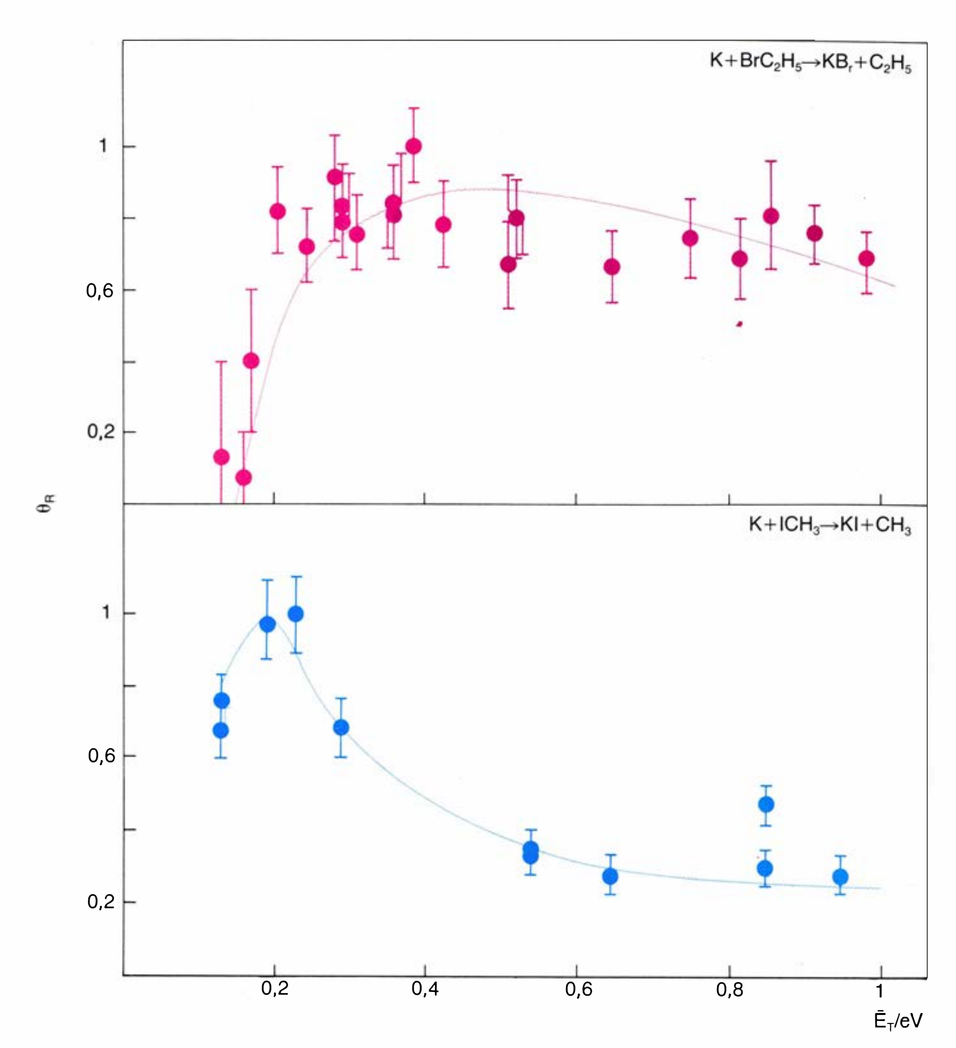
En nuestro laboratorio de la Universidad Complutense hemos realizado experimentos de quimiluminiscencia, en la gama visible del espectro, producida por el choque entre dos haces bien colimados. En concreto, se ha provocado el choque de un haz de calcio metaestable, electrónicamente excitado, en los estados ^3P y ^1D, con un haz molecular de hexafluoruro de azufre. (Los estados P y D designan, según

el convenio al uso, distintos estados electrónicos excitados del átomo de calcio.) El haz de calcio metaestable se formó por descarga eléctrica de bajo voltaje. Estos haces son elementos conductores, por lo que se puede hacer pasar, a través de ellos, una descarga eléctrica. Cuando eso ocurre, se forman estados excitados que viven muy poco, algunos nanosegundos, como por ejemplo el calcio en su estado ^1P.

Tal y como hemos mencionado, también se forma calcio excitado en el estado ^3P que vive alrededor de medio milisegundo, pues la transición hacia el estado fundamental está prohibida por las reglas de selección de la espectroscopía óptica, al ser éste un singlete ^1S (es decir, el tránsito involucra un cambio de multiplicidad, desde un triplete hasta un singlete). La larga vida del calcio en dicho estado constituye una suerte, pues le da tiempo suficiente para viajar y chocar con el otro haz de hexafluoruro de azufre que pasa alrededor de 12 centímetros más alejado del punto donde se produce la descarga. Y, dada la energía de los haces, se ha podido formar monofluoruro cálcico en distintos estados electrónicos cuya emisión espontánea se ha colectado, consiguiéndose así un espectro de quimiluminiscencia para dicha reacción.

La energía de excitación electrónica del átomo de calcio en su estado ^3P se cifra en torno a los 183 kilojoule por mol; hay, pues, energía suficiente para que puedan formarse los dos primeros estados electrónicos excitados del monofluoruro cálcico. Para ello sólo se necesitan 44 y 73 kilojoule por mol, respectivamente. Ahora bien, si se usa el calcio en su estado fundamental, no queda energía suficiente para producir, en la colisión, dichos estados excitados; es decir, no aparece ninguna quimiluminiscencia. Ello constituye un ejemplo claro de cómo la excitación energética de los reactivos, en este caso electrónica, permite crear y, por tanto, estudiar, productos altamente excitados, inaccesibles por otros medios más tradicionales.

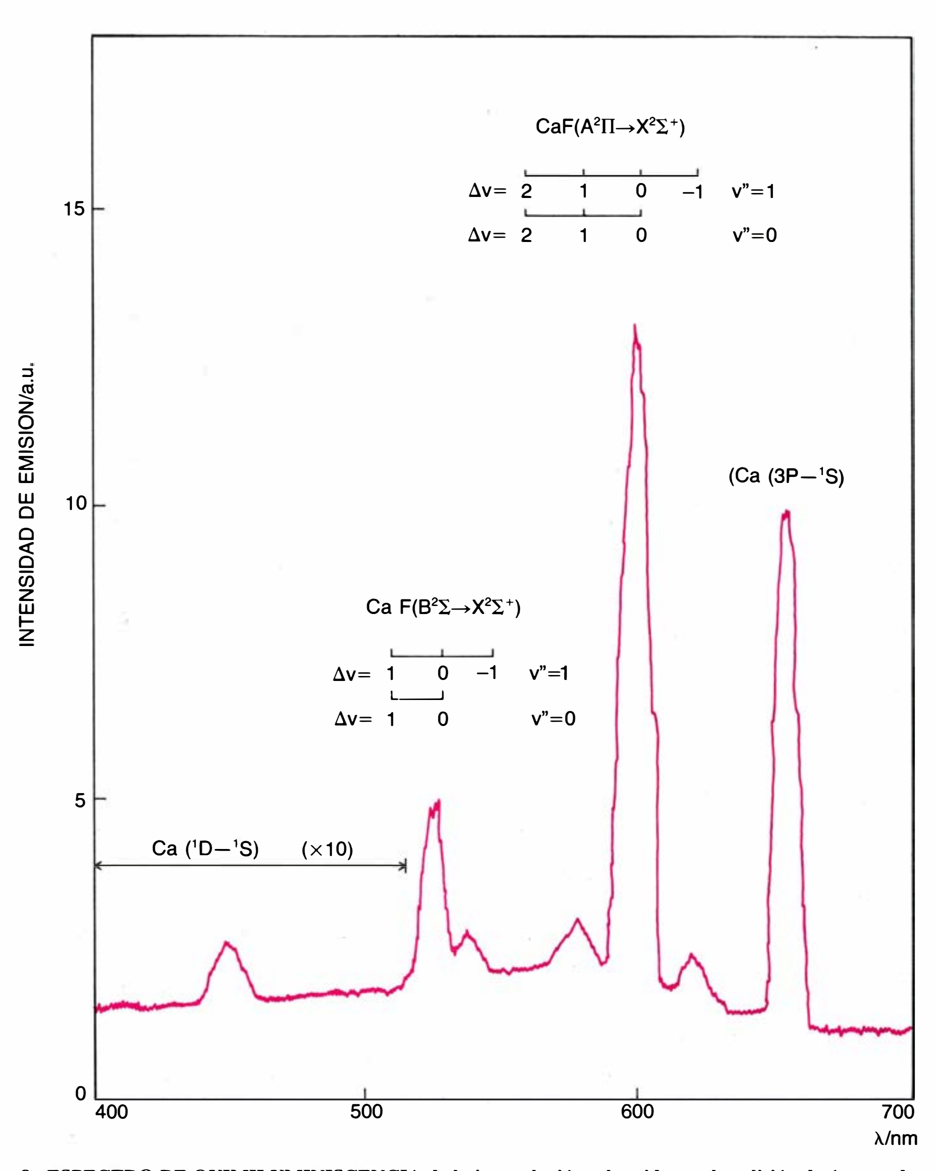
Cuando una molécula en su estado fundamental absorbe un fotón, la excitación puede producir un cambio en la energía electrónica, vibracional y rotacional de la molécula. Ese exceso de energía puede disiparse de varias maneras: mediante choques con otras moléculas, a través de una reacción química o incluso volviendo al estado electrónico fundamental. Este proceso de reemisión fotónica recibe el nombre de fluorescencia. Cuando el fotón empleado en un comienzo para excitar la molécula procede de una fuente láser, el proceso se denomina fluorescencia inducida por láser (FIL).



7. COMPOSICION DE VARIAS FUNCIONES DE EXCITACION medidas por la técnica de haces moleculares. Se representa cómo varía el tamaño reactivo (ordenadas) en función de la energía de colisión (abscisas). La información global que nos da este tipo de mediciones es la variación de la reactividad con la energía de translación relativa de los reactivos. En el esquema superior se recoge el comportamiento de esa variación en la reacción del átomo de potasio con bromuro de propilo para dar bromuro potásico y radical propilo; abajo, el comportamiento de la variación en la reacción del átomo de potasio con el ioduro de metilo para dar ioduro potásico y radical metilo. Los símbolos son datos experimentales. Las líneas de trazo grueso permiten seguir con mayor nitidez el comportamiento. Nótese cómo arriba puede determinarse el umbral de la reacción mediante una extrapolación de la línea de trazo grueso a bajas energías. En la ilustración se aprecia una energía de colisión para la cual la reactividad es máxima, característica típica del sistema.

Los experimentos de FIL en un haz molecular tienen a su favor la ausencia de colisiones que permitan desactivar el estado electrónico excitado por vías no radiativas. O lo que es lo mismo: la excitación se pierde necesariamente por emisión de fotones. De este modo, los tiempos de vida media, determinados en tales condiciones, serán tiempos de vida radiativos; valores temporales de vida media que no precisan corrección por los efectos de las colisiones, pues en el haz molecular éstas no tienen lugar.

En los procesos de fluorescencia inducida por láser se mide la evolución temporal de la fluorescencia al excitar con un pulso de varios nanosegundos un haz molecular. Es decir, después de excitar la molécula con un láser pulsado durante varios nanosegundos, se mide la intensidad de la luz que la molécula reemite. El descenso de intensidad puede describirse en muchos casos por una exponencial decreciente, de cuyo exponente se puede obtener el tiempo de vida media radiativa (libre de colisiones) de la molécula excitada. En nuestro laboratorio hemos utilizado la técnica de FIL en haces moleculares de iodo con el fin de medir su tiempo de vida radiativo en algunos de sus estados electrónicos excitados. Para ello se recurrió a un láser pulsado de colorante sintonizado a una longitud de onda de 588,3 nanómetros. La vida media obtenida para la molécula de iodo en estas condiciones fue de 800 nanosegundos.



8. ESPECTRO DE QUIMILUMINISCENCIA de baja resolución, obtenido por la colisión de átomos de calcio excitados en sus estados triplete P y singlete D cuyas emisiones pueden observarse. En ordenadas se representa la intensidad de la emisión; en abscisas se simboliza la longitud de onda en nanómetros. En la parte central aparece el espectro de las bandas de monocloruro cálcico. Se distinguen aquí dos transiciones cuyos símbolos espectrales se señalan entre paréntesis. Los niveles vibracionales involucrados en estos tránsitos se manifiestan debajo mismo de los tránsitos electrónicos señalados del monofluoruro cálcico.

La técnica de fluorescencia inducida por láser dedicada al estudio de la dinámica de las reacciones químicas fue desarrollada por Richard N. Zare y colaboradores, a principios de los setenta, en la Universidad neoyorquina de Columbia. La importancia de la misma en las reacciones químicas −y en concreto en el tema de nuestro artículo− puede ilustrarse con algún ejemplo.

Si los productos oscuros, es decir, el diátomo no excitado y recién formado, tienen estados excitados que emitan fluorescencia, la emisión puede inducirse por excitación con una fuente de luz adecuada. Se dispara el láser hacia la zona de cruce de los haces y se provoca la fluorescencia de la molécula recién formada en el choque reactivo. Si usamos un láser sintonizable, cuya longitud de onda podamos variar de manera continua, podrá medirse la variación de la intensidad de la fluorescencia en función de la longitud de onda de excitación. Este tipo de espectro se denomina espectro de excitación. La intensidad de la fluorescencia es proporcional, entre otros factores, a la población molecular del nivel de partida, cuya transición se excita por absorción fotónica. De ahí, pues, que dichos espectros de excitación se empleen para conocer la población relativa en los distintos niveles vibracionales en que se ha formado la molécula producto tras el choque reactivo.

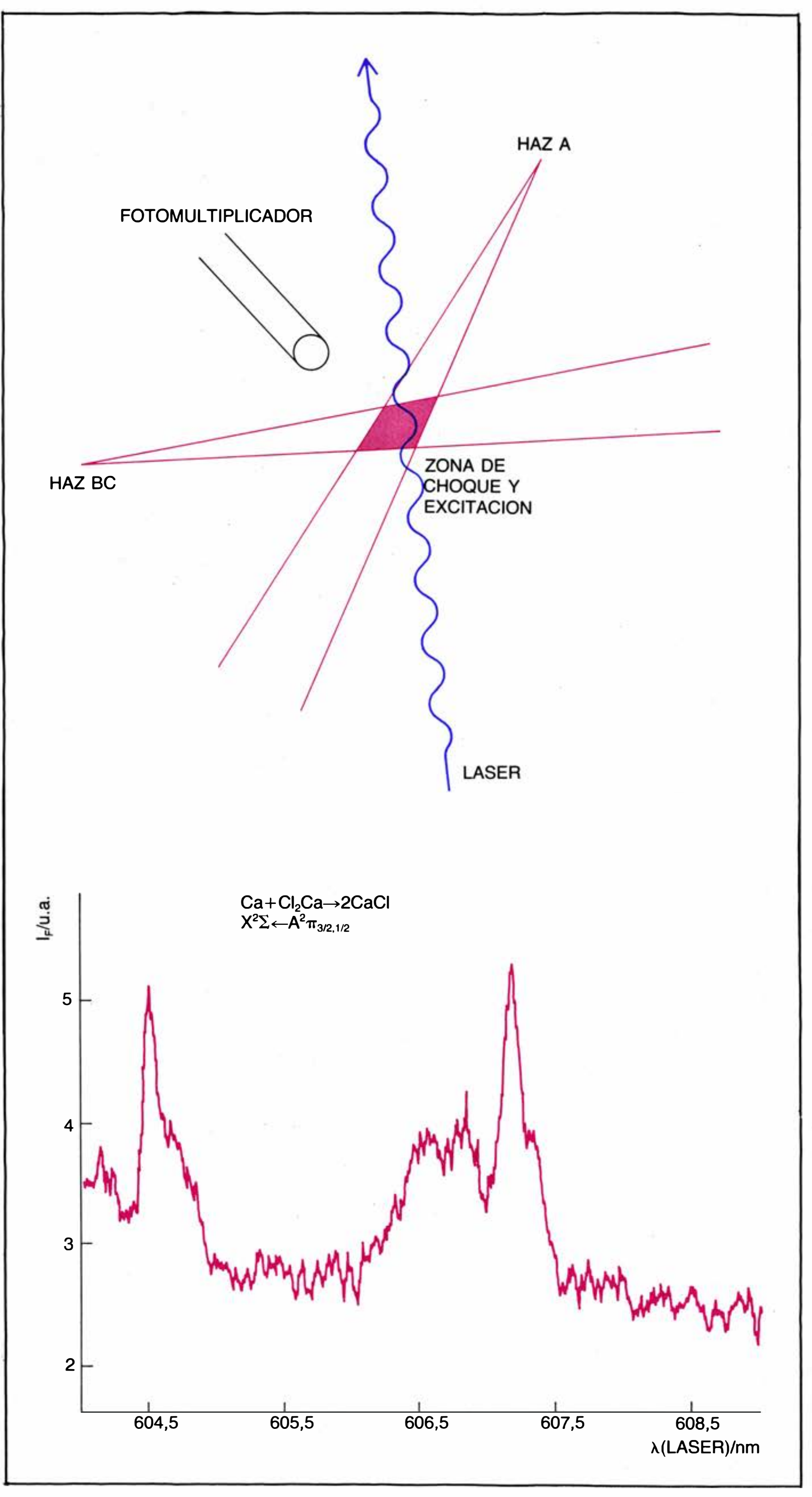
A este propósito resulta ilustrativo un experimento que hemos llevado a cabo en nuestro laboratorio de la Universidad de Madrid. Se trata de provocar, en un horno de alta temperatu-

ra, la reacción constituida por calcio atómico más dicloruro cálcico para producir dos moléculas de monocloruro cálcico. Dicho proceso se desarrolla también en unas condiciones de alto vacío, exigencia necesaria para formar monocloruro cálcico entre otros componentes. En esas circunstancias se puede excitar la fluorescencia inducida por láser de este monocloruro cálcico en el haz molecular y detectar no sólo su formación y cantidad, sino también el estado cuántico en que se producía. Estudios que difícilmente pueden llevarse a cabo en otro marco, pues el radical cloruro cálcico es inestable, salvo en condiciones de haz molecular, con apenas colisiones que le perturben.

De estos ejemplos, y a modo de resumen, se infiere que la técnica de haces moleculares permite, por sus características de colisión única, abordar el estudio microscópico de las reacciones químicas y entender el mecanismo molecular de la ruptura y formación de los enlaces. Hemos visto que existe una clara correlación entre la distribución angular de los productos y el tiempo de vida del intermedio de la reacción, y hemos considerado también las fuerzas que rigen ese tipo de interacción. Acelerando la velocidad de las moléculas puede determinarse la energía umbral de las reacciones químicas.

También puede estudiarse la dinámica de las especies excitadas mediante la preparación de reactivos con excitación vibracional o electrónica; y, también, mediante el registro de la quimiluminiscencia de los productos, cuando hay varios canales de formación excitada de dichos productos. Las interacción entre el láser y el haz molecular posibilita la creación de reactivos en un estado cuántico determinado y analizar consiguientemente el papel específico de esa excitación.

Hemos visto cómo gracias a la inducción de la fluorescencia de moléculas por excitación con láser, desde un estado fundamental obscuro o no fluorescente hasta otro, electrónico excitado, se creaban espectros de excitación que permitían conocer la reactividad química estado a estado. Más concretamente, a partir de las intensidades de las líneas de varias transiciones se establece la población relativa de los distintos estados vibro-rotacionales de la molécula recién formada en la reacción. Así, no sólo conocemos mejor el mecanismo de las reacciones sino que, además, podemos preparar láseres químicos, láseres en que la energía procede de una reacción química.



9. FLUORESCENCIA INDUCIDA POR LASER, técnica para el estudio de la dinámica molecular de la reacción química. La excitación mediante un láser de colorante, de longitud de onda sintonizable, de la fluorescencia de una molécula recién formada en una reacción química permite conocer los distintos estados internos en los que dicha molécula se ha formado y así ganar información acerca de las fuerzas que controlan estos procesos químicos fundamentales. *Arriba*: esquema de choque de las substancias A + BC para dar AB + C, en cuya zona de colisión se dirige un láser para excitar la molécula AB a un estado electrónico excitado y recoger posteriormente la fluorescencia, mediante un fotomultiplicador, en función de la longitud de onda. La representación de la intensidad de fluorescencia en función de la longitud de onda recibe el nombre de espectro de excitación. *Abajo*: espectro de excitación del monocloruro cálcico formado en un haz molecular mediante la reacción del calcio con el dicloruro cálcico. Las dos bandas más importantes corresponden a los tránsitos entre el estado fundamental —un doblete sigma— y los dos estados excitados —doblete pi—.



La luz, activadora de genes vegetales

¿Cómo van trazando los rayos solares el destino de una plántula? Se han encontrado segmentos de ADN que, en respuesta a la energía luminosa, activan genes necesarios para el desarrollo

Phyllis B. Moses y Nam-Hai Chua

Las plantas verdes son máquinas que funcionan con energía solar. La luz constituye la fuerza motriz de la fotosíntesis, proceso por el cual los vegetales convierten el dióxido de carbono y el agua en azúcares, almidón y oxígeno. En efecto, captan la energía solar y la convierten en sustancias que, directa o indirectamente, sustentan la mayoría de las restantes formas vivas.

Se equivoca, sin embargo, quien crea que, para la planta, la luz no es más que un combustible. Antes incluso de que el brote rasgue la cubierta seminal, la presencia o ausencia de luz regirá su vida. La luz le indica al vegetal hasta qué altura debe crecer, cuántas hojas han de brotar, cuándo ha de florecer y fructificar y, por fin, cuándo debe envejecer. Así, además de constituir una fuente de energía para la fotosíntesis, la luz modela la planta a través del proceso de fotomorfogénesis.

Para controlar el desarrollo de una planta, la luz debe ejercer algún efecto sobre los genes, los responsables del desarrollo. Se han descrito detalladamente las reacciones bioquímicas implicadas en la fotosíntesis, pero sigue sin esclarecerse la intervención de la luz en la expresión de los genes. Hace seis años nos propusimos identificar las bases bioquímicas de la fotomorfogénesis partiendo del estudio de los propios genes fotosensibles. Queríamos determinar las secuencias génicas que reaccionaban a la luz. Aplicando las técnicas de la ingeniería genética, las hemos encontrado ya; las llamaremos elementos fotosensibles, o LRE (por *light-responsive elements*).

1. PLANTA DE TABACO, que ocupa lugar destacado en los estudios sobre regulación génica por medio de la luz. Las células de tabaco se adecúan bien a las técnicas de la ingeniería genética y se regeneran plantas enteras en cultivos de células transformadas.

Nuestro equipo del laboratorio de biología vegetal molecular de la Universidad Rockefeller es uno de los varios que estudian el control de los LRE. Para caracterizar esos elementos partíamos de la información y los métodos de trabajo elaborados durante la última década por otros investigadores. Las enzimas con las que cortamos y empalmamos los genes, el vector que usamos para transferir genes a las células vegetales o las hormonas que nos ayudaron a regenerar plantas enteras a partir de células aisladas constituyen una muestra del legado metodológico que hemos heredado.

Con esos métodos logramos fabricar genes que eran una amalgama de ADN de procedencia bacteriana y vegetal; también mezclamos el material genético de guisantes, petunias y tabaco. Nuestros experimentos ejemplifican los trabajos en curso cuyo objetivo es esclarecer la biología molecular de los vegetales. Aunque, por la complejidad y elegancia inherentes a las manipulaciones bioquímicas de las plantas, estas investigaciones resultan de por sí fascinantes, esperamos que, en última instancia, los conocimientos adquiridos en el laboratorio sirvan también para obtener en un futuro cosechas mejores y más abundantes.

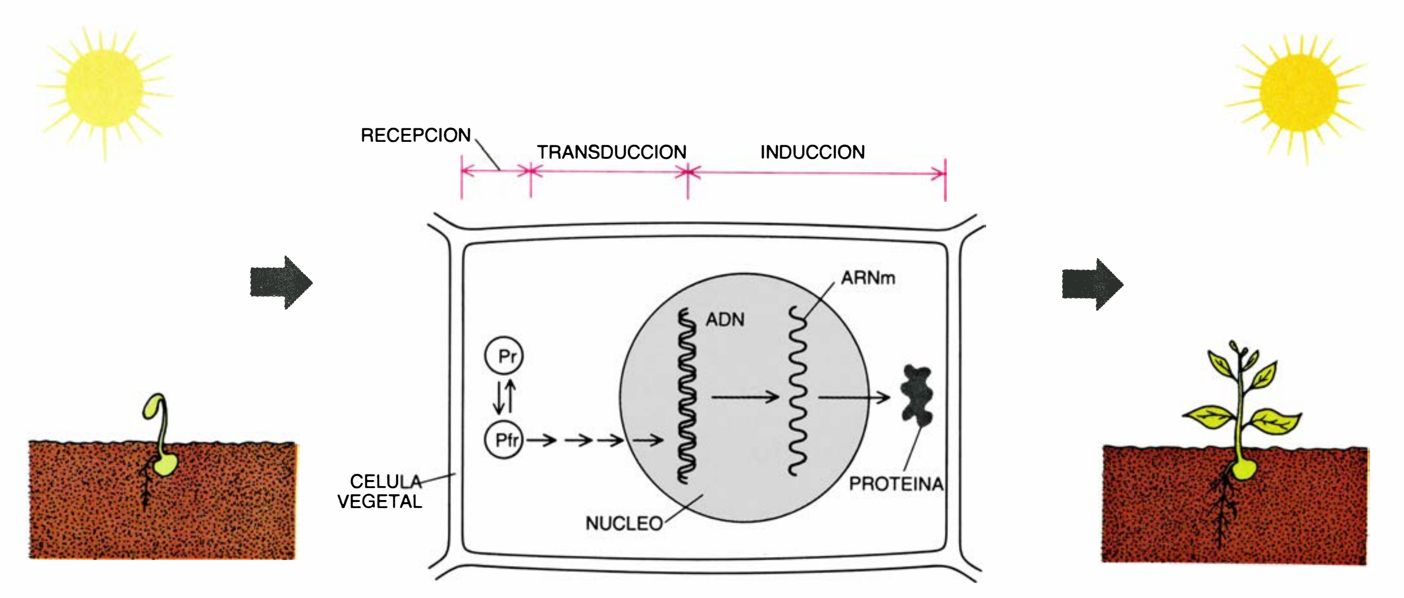
La fotomorfogénesis se presta a una división conceptual en tres apartados: captación de la luz mediante pigmentos, transducción de la señal luminosa del pigmento al gen e inducción del desarrollo por regulación genética [*véase la figura 2*]. De estos apartados, la transducción se ha demostrado la más inaccesible. Se sabe poco sobre la forma que adopta la señal luminosa en el interior de las células vegetales vivas para intervenir, directamente o a través de moléculas intermediarias, en el aparato genético regulador.

Mejor se conoce la recepción de la luz. El pigmento verde clorofila atrapa la energía luminosa para la fotosíntesis, mientras que, en la fotomorfogénesis, el fotorreceptor es un pigmento verde azulado, denominado fitocromo, que se halla en las plantas en mucha menor cantidad que la clorofila. Se encuentra en dos formas interconvertibles, una de las cuales absorbe luz roja de longitudes de onda cercanas a los 630 nanómetros y, la otra, luz del "rojo lejano", es decir, longitudes de onda próximas a los 730 nanómetros (milmillonésimas de metro). Las dos formas se denominan Pr y Pfr, respectivamente.

El fitocromo viene a ser una especie de conmutador biológico. Cuando una de las formas del pigmento recibe luz de la longitud de onda adecuada, se transforma en la otra forma: la luz del rojo lejano convierte el Pfr en Pr y, la roja, el Pr en Pfr. Esta última forma de fitocromo desencadena la secuencia de acontecimientos que culminarán en la fotomorfogénesis. A la luz de la región roja del espectro corresponde, pues, inducir la expresión de algunos de los genes que controlan el desarrollo.

Los genes ejercen su influencia a través de las proteínas que codifican. Cuando se induce un gen, su secuencia de ADN bicatenario, formado por los "nucleótidos" cuya denominación abreviamos por *A*, *T*, *G* y *C*, se transcribe en un ARN mensajero (ARNm) monocatenario, constituido por cuatro nucleótidos análogos. A su vez, la información codificada en el ARNm se traduce a una proteína específica, que puede formar parte integrante de una estructura o puede desempeñar una función que ayude a determinar la forma de la planta.

Muchos genes están controlados por las secuencias de ADN que les rodean. Tales regiones reguladoras gobiernan la expresión del gen modulando su



2. FOTOMORFOGENESIS, proceso trifásico por el que la luz influye sobre la forma de la planta. Se esquematiza aquí para el caso de una célula de guisante. En la primera fase, la recepción, mediante una reacción reversible la luz provoca la conversión de un pigmento (*Pr*) en su forma molecular alternativa (*Pfr*). La presencia del Pfr inicia la transducción, una serie de pasos que comunican la señal luminosa a los genes de la planta, situados en el núcleo celular. La señal transducida inducirá, o activará, algunos genes, que se transcribirán en ARN mensajeros y traducirán a las proteínas que dan forma a la planta en desarrollo.

transcripción en ARNm. Nuestros estudios de inducción por la luz se centraron precisamente en el análisis de esas regiones. Comenzamos por averiguar qué secuencias de ADN, lindantes con un gen sensible a la luz, resultaban necesarias para gobernar la actividad de éste en el transcurso del desarrollo. En última instancia, pretendíamos desentrañar la cadena de acontecimientos por los que la luz, mediante fotorreceptores como el fitocromo y, probablemente, en asociación con varias proteínas, transmitía su señal a esas secuencias reguladoras.

Para identificar las secuencias reguladoras fotosensibles tuvimos primero que localizar los genes que reaccionaban a la luz. Se conocen docenas de genes sobre los que la luz causa algún efecto, y en la regulación de muchos de ellos interviene el fitocromo. La cantidad de ARNm que se transcribe de ellos suele variar de forma directa en respuesta a la luz. En algunos casos, la luz roja disminuía la expresión del gen. Por ejemplo, bajo luz roja, se reducía la expresión del que codifica al propio fitocromo; de ese modo, en una suerte de bucle de retroalimentación negativa, el pigmento modulaba su propio gen.

Sin embargo, es un hecho conocido que la luz roja activa los genes que determinan la ribulosa 1,5 difosfato carboxilasa, abreviada RUBISCO (por *ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase-oxygenase*). Esa enzima fotosintetizadora es la más importante de cuantas intervienen en la fijación del dióxido de carbono atmosférico, uno de los procesos biológicos terrestres fundamentales. Como tal, probablemente sea la enzima más abundante del globo. La molécula activa de RUBISCO está constituida por dos tipos de subunidades, codificadas por genes distintos.

Decidimos que la subunidad menor de la RUBISCO, conocida como rbcS, constituiría un material ideal para nuestras investigaciones. Por una parte, resultaba fácil la identificación de la proteína y de su ARNm en las plantas verdes normales, pues las producen las hojas en grandes cantidades. Por otra parte, la respuesta del gen a la luz es muy acusada, señal de que sus secuencias reguladoras ejercen un control eficaz sobre la transcripción del ARNm; las plantas crecidas en oscuridad contienen menos de una vigésima parte del ARNm para rbcS que elaboran las plantas crecidas a la luz. Además, y por ser esa subunidad enzimática esencial en la mayoría de los organismos vegetales, todas las especies de plantas superiores comparten el gen de la rbcS, incluidas las que han seguido caminos evolutivos divergentes. Tal similitud resultó crucial, pues deseábamos transferir genes entre diferentes especies vegetales y queríamos que los genes foráneos se desenvolvieran correctamente en sus nuevos hospedadores.

El vector habitual en la transferencia de genes a los vegetales es la bacteria del suelo *Agrobacterium tumefaciens* [*véase* "Un vector para introducir genes en vegetales", por Mary-Dell Chilton; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1983]. Se trata de un auténtico ingeniero genético: en estado salvaje inserta un pequeño segmento de su propio ADN en los cromosomas de las células vegetales, instando el crecimiento de un tumor bulboso denominado agalla del cuello (o de la corona). En el interior de la bacteria, los genes que habrán de transferirse se disponen en un plásmido, o molécula anular de ADN. La transferencia viene mediada por las secuencias de ADN limítrofes con los genes inductores del tumor. Con técnicas de biología molecular, pueden remplazarse los genes del plásmido causantes del tumor por un gen de elección; las secuencias limítrofes insertarán entonces el gen foráneo en los cromosomas de la planta del mismo modo que se insertan los genes inductores del tumor [*véase la figura 3*].

A principios de la década de 1980, en el procedimiento habitual de introducción del plásmido transformado en las células vegetales se mezclaba *Agrobacterium* con las células, aisladas en un cultivo *in vitro*. Hoy se prefiere diseminar el microorganismo por incisiones realizadas en una hoja, sometida luego a cultivo. En cualquier caso, las células que han adquirido el nuevo gen lo transmitirán cuando se dividan. Las plantas, enteras y regeneradas a partir de ellas, poseen al menos una copia del nuevo gen en cada célula. Salvo por la presencia de ese, llamémosle, transgén, las plantas son normales y producen semillas que son también portadoras del gen transferido.

Se valora la expresión de un transgén midiendo la cantidad de ARNm transcrito a partir suyo. La técnica de hibridación permite ponderar el ARNm. Se basa ésta en que las cadenas de ARNm se emparejan con hebras de ADN monocatenario cuando los nucleótidos de ambas son complementarios. Para detectar ARNm generado por un transgén, el bioquímico prepara una sonda: una cadena de ADN complementario al ARNm derivado del transgén y que esté marcada con un isótopo radiactivo. Cuando la sonda se une al blanco, éste se distingue en virtud del marcaje. Cuantificar la radiactividad de las sondas ligadas equivale a cuantificar el ARNm generado por el transgén.

La hibridación puede ser muy sensible: en ciertas condiciones, para que tenga lugar la unión, las secuencias de las dos cadenas deben ser exactamente complementarias. Resulta así que, a pesar de la semejanza entre las proteínas rbcS producidas por todas las plantas, los ARNm generados por especies vegetales distintas se apartan lo suficiente del ARNm del transgén para que éste se distinga de la versión "nativa" mediante técnicas de hibridación. Tal capacidad iba a ser decisiva para nuestros propósitos, pues nos brindó una forma fiable de cuantificar la expresión del transgén en las plantas hospedadoras. Por último, mediante la manipulación de las secuencias de ADN que rodean a un transgén y midiendo, en cada caso, el ARNm transcrito a partir suyo, esperábamos acercarnos a las regiones de intervención decisiva en el control génico: las secuencias reguladoras.

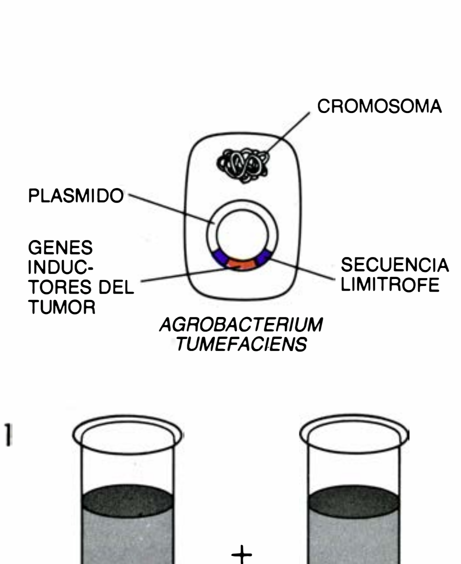
Llevamos a cabo nuestros primeros experimentos de transferencia génica con células vegetales cultivadas *in vitro*. En nuestro laboratorio, Richard M. Broglie y Gloria M. Coruzzi aislaron un gen de la rbcS de una planta de guisante; en colaboración con Robert T. Fraley, Steven G. Rogers y Robert B. Horsch, de la Compañía Monsanto, introdujeron luego el gen en células de petunia. Las células expresaron correctamente el gen foráneo, produciendo ARNm de la rbcS y la propia proteína rbcS. Se combinó incluso la subunidad rbcS del guisante con subunidades de RUBISCO de petunia formando la enzima completa. Anthony R. Cashmore, de la Universidad Rockefeller, Luis Herrera-Estrella, de la Estatal belga de Gante, y sus colegas obtuvieron resultados similares transfiriendo el gen de rbcS de guisante a células de tabaco.

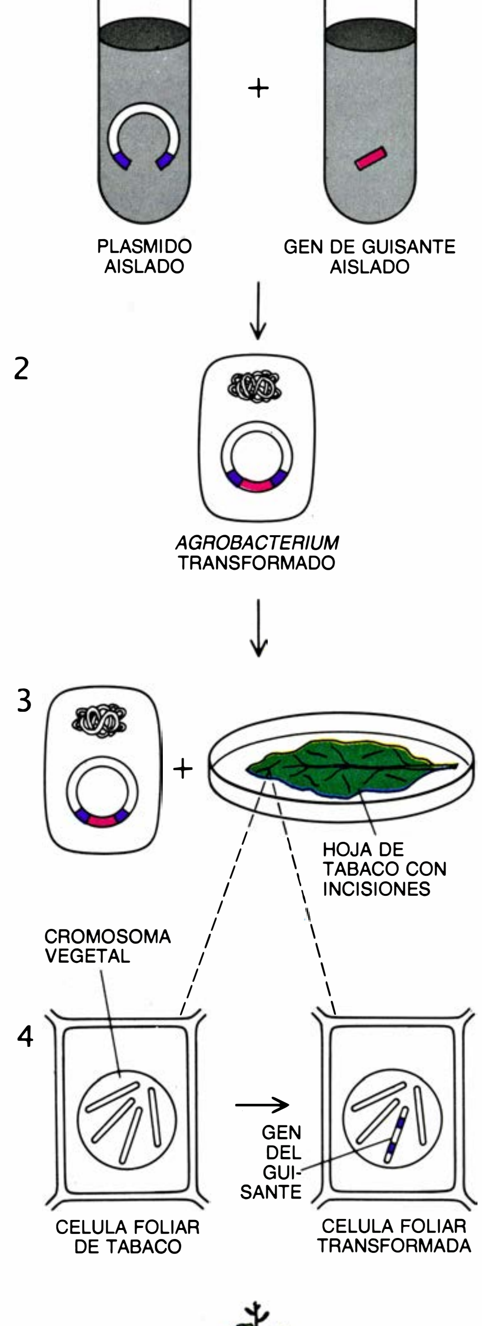
Investigadores de nuestro laboratorio examinaron posteriormente las secuencias de la región "corriente arriba" ("upstream") del gen de la rbcS del guisante, es decir, las secuencias que preceden al gen en el sentido de la transcripción. Es en la región de ADN no codificadora, anterior al gen, donde suelen localizarse las secuencias reguladoras. Denominadas promotoras, tales secuencias constan de dos subregiones distintas. Una de ellas, breve, indica dónde debe comenzar la transcripción de la cadena de ARNm. Similar en los genomas de bacterias, animales y vegetales, se denomina "caja TATA", por sus series más corrientes de nucleótidos. También anterior, y a mayor distancia, una secuencia de ADN más compleja controla las condiciones bajo las cuales tiene lugar la transcripción y la cantidad de ARNm elaborado.

Giorgio Morelli y Ferenc Nagy pretendían definir de forma precisa el promotor del gen de la rbcS; para ello, generaron una serie de "mutantes por deleción", a los que se les había extraído fragmentos progresivamente mayores de la región anterior al gen de la rbcS. Analizaron la actividad del gen en un cultivo in vitro de células de petunia. Consiguieron así demostrar la participación de una breve secuencia de la vecindad de la caja TATA en la regulación ejercida por la luz. Cashmore, Herrera-Estrella y sus ayudantes corroboraron esos hallazgos y se aprestaron a comprobar si la región anterior a la caja TATA intervenía también en la respuesta a la luz. Introdujimos en ese punto el término LRE para referirnos a dicha región.

Para obtener información de índole más fisiológica, Robert Fluhr y Cris J. Kuhlemeier, de la Universidad Rockefeller, regeneraron plantas enteras de petunia y tabaco a partir de cultivos *in vitro* de hojas que contenían el gen del guisante para la rbcS. Esas plantas "transgénicas" mostraban una expresión del transgén notablemente fiel en diferentes órganos y bajo diversas condiciones de luz. El patrón de expresión de las hojas, tallos y raíces semejaba el observado en plantas normales: las hojas poseían gran cantidad de ARNm, los tallos cantidades mucho menores y en las raíces apenas había. La luz roja estimulaba la transcripción del ARNm a partir del gen foráneo de la rbcS, mientras que un tratamiento posterior con luz del rojo lejano detenía la estimulación. Las plantas crecidas en oscuridad contenían poco ARNm procedente del transgén.

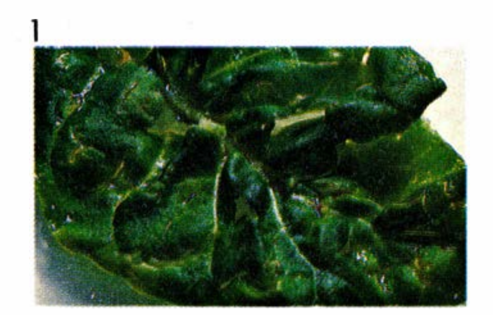
Sorprende la gran fidelidad de la expresión cuando se considera el amplio intervalo evolutivo que separa los organismos de origen de los genes y sus nuevos hospedadores. Los linajes del guisante y del tabaco, por ejemplo, di-

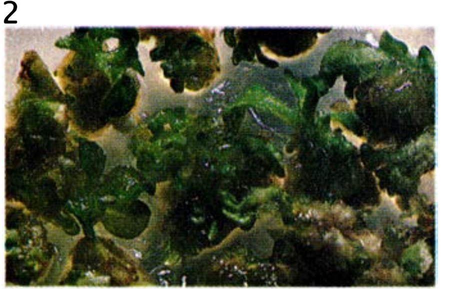






3. PASO DE GENES de una especie vegetal a otra; precisa la ayuda del microorganismo *Agrobacterium tumefaciens*. Esa bacteria porta un elemento anular de ADN, un plásmido, que en circunsatncias normales provoca tumores en las plantas, pues transfiere genes deletéreos a su hospedador. Los fitobiólogos extraen las secuencias que inducen el tumor y las sustituyen por un gen aislado de una planta de guisante (*1*). Se devuelve a *Agrobacterium* ese plásmido artificial (*2*) y se introduce la bacteria transformada en las células vegetales de una especie distinta a través de heridas practicadas en una hoja (*3*). Las células infectadas por la bacteria adquieren el gen del guisante (*4*). El medio de cultivo donde se encuentra embebida la hoja estimula el crecimiento de las células que portan el "gen transferido", pero elimina las que carecen de él. En unas semanas, las "plántulas" se transplantan a una maceta (*5*).









4. REGENERACION DE PLANTAS que permite a los biólogos observar los efectos fisiológicos que ejercen los genes transferidos sobre plantas enteras, en lugar de limitar el análisis, como hasta entonces, a unas pocas células. La técnica, puesta a punto hace sólo tres años, parte de la hoja de una planta dispuesta en agar, un substrato gelatinoso (en este caso la planta es de tabaco). Se practican incisiones en la hoja y las heridas se infectan con una bacteria transformada (*1*). La bacteria transporta un gen que confiere resistencia a un antibiótico; puesto que se añade al agar ese mismo antibiótico, sólo sobreviven las células vegetales que captan los genes de las bacterias transformadas (*2*). Los nutrientes y hormonas del agar sustentan a los jóvenes vástagos que crecen a partir de las células transformadas (*3*). Posteriormente, las plantas, de tabaco aquí, regeneradas se trasplantan para que gocen de mayor espacio (*4*). Unas seis semanas después de iniciarse el experimento las plantas han desarrollado raíces y están listas para transplantarlas al suelo.

vergieron hace 70 millones de años. También resulta excepcional la integridad funcional del transgén si se tiene en cuenta que el vector *Agrobacterium* deposita el gen al azar en el genoma de la célula vegetal. Por tanto, su correcta regulación debe estar basada principalmente en el control ejercido por la LRE adyacente.

Manipulaciones más minuciosas del LRE del gen de la rbcS demostraron que ese elemento puede conferir sensibilidad a la luz a una caja TATA foránea y situada en su esfera de influencia: cajas TATA de genes que operan bajo cualquier condición se tornaron dependientes de la luz para su adecuado funcionamiento cuando se acoplaron con el LRE. Y no sólo eso, el LRE puede regular genes foráneos colocados bajo su control. Los experimentos en los que se engarzaron genes extraños en el LRE del gen de la rbcS revelaron que, además de sensibilidad a la luz, la secuencia reguladora confería especificidad de órgano, estableciéndose una pauta de expresión elevada en las hojas, baja en los tallos y nula en las raíces.

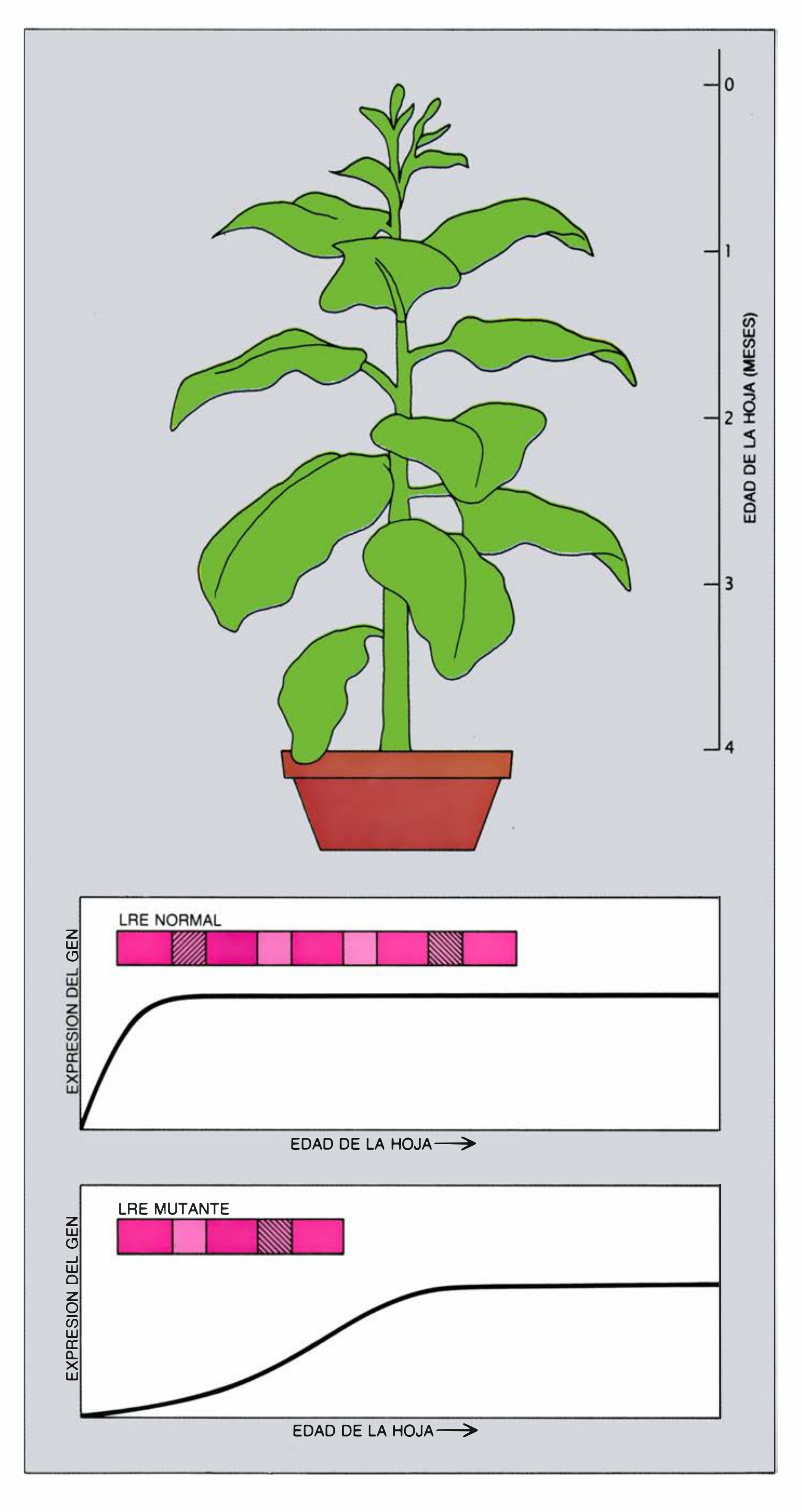
En los dos últimos años, nuestro laboratorio ha comenzado a identificar la composición exacta de las secuencias de ADN que forman el LRE del gen de la rbcS. Pamela J. Green y Maria A. Cuozzo, trabajando con Kuhlemeier, determinaron que el LRE consta de dos regiones de ADN más cortas, cada una de las cuales puede mediar en la acción de la luz y en la especificidad de los órganos: la información genética contenida en el LRE está repetida.

¿Qué razón hay para que una secuencia reguladora de genoma vegetal sea redundante? Creemos que, durante ciertas etapas del ciclo vital de la planta, la fotomorfogénesis podría exigir la presencia de múltiples copias de elementos fotosensibles. De hecho, Kuhlemeier acaba de encontrar que, para

REGION ANTERIOR — REGION POSTERIOR

	LUZ			OSCURIDAD		
	HOJAS	TALLO	RAICES	HOJAS	TALLO	RAICES
LRE / CAJA TATA / GEN DE LA rbcS	+++	+	–	–	–	–
	+++	+	–	–	–	–
	+	–	–	–	–	–
	–	–	–	–	–	–
GEN FORANEO	+++	+++	+++	+++	+++	+++
LRE	+++	+	–	–	–	–

5. POR MANIPULACION GENETICA se ha revelado que un segmento de ADN "anterior" al gen sensible a la luz de la rbcS regula la expresión de ese gen. En la parte superior del diagrama se muestra el gen de la rbcS y su región reguladora, que incluye el "elemento fotosensible" (LRE) y la denominada caja TATA, junto con los niveles normales de expresión, observados, tanto a la luz como en oscuridad, en hojas, tallos y raíces. Debajo aparecen mutantes desprovistos de porciones cada vez mayores de la región reguladora; ante la redundancia de esa región, en la mayoría de las plantas hospedadoras la región LRE puede dividirse en dos sin que ello afecte a la expresión. La región confiere también reactividad a la luz y especificidad de respuesta del órgano a un gen foráneo cuya expresión es, en circunstancias normales, independiente de esos factores, como se ha demostrado al colocar un LRE en la región anterior al gen.



6. AL PARTIRSE EN DOS el LRE del gen fotosensible de la rbcS se interrumpe su expresión en las hojas más jóvenes de la planta de tabaco. El LRE normal del gen de la rbcS, que se muestra en el gráfico superior, presenta dos subregiones redundantes, cada una de ellas dotada de dos sitios de unión a proteínas (*cuadrados claro y rayado*). Con ese LRE se alcanza la expresión máxima en casi todas las hojas de la planta. Cuando únicamente existe una subregión (*gráfico inferior*), las hojas más jóvenes no alcanzan la expresión completa. Los datos presentados aquí tienen todavía carácter provisional, pero los experimentos llevados a cabo sugieren que la redundancia genética podría desempeñar un papel importante en el desarrollo vegetal.

que se alcance una expresión completa del gen de la rbcS en las hojas más jóvenes de plantas de tabaco, se necesitan ambas subregiones [*véase la figura 6*]. Si se juzga sintomático ese descubrimiento, debe ser muy complejo el papel que desempeñan las regiones LRE en el desarrollo vegetal.

Los datos de que se dispone sobre genes animales de regiones de función similar confirman esa complejidad. Tales regiones controlan también el desarrollo, aunque respondan ante estímulos muy distintos. Al igual que sus análogas vegetales, las secuencias ejercen grados de control variables que dependen del tipo de órgano y del estado de desarrollo del animal. Por ejemplo, la expresión del gen de la insulina en las células pancreáticas de mamíferos está gobernada por una secuencia reguladora de ADN.

En general, se conoce mejor el funcionamiento de las secuencias reguladoras animales que sus equivalentes florales. Los bioquímicos vegetales han abordado el análisis de las estructuras LRE en un nivel de detalle más fino, para determinar cómo actúan y cómo varían sus respuestas en función de la calidad de la luz, del tipo de órgano y del estado de desarrollo de la planta. Cabe esperar que las investigaciones sobre los mecanismos de transducción de la señal luminosa rindan abundantes datos. Resulta verosímil que el pigmento fitocromo active los intermediarios moleculares que transmiten la señal al LRE. Según parece, Green y su colega Steve A. Kay han identificado ya un candidato para el papel de intermediario, un factor proteico localizado en el núcleo de la célula vegetal. La proteína se une a dos secuencias específicas de ADN de cada subregión del LRE; en el tubo de ensayo, las mutaciones del LRE que debilitan esa unión relajan también la expresión del gen de la rbcS.

El estado actual del conocimiento apenas permite adivinar cómo la luz gobierna, con delicada precisión, el crecimiento, desarrollo y envejecimiento de los vegetales. Un mejor dominio de la fotomorfogénesis ofrecería innumerables ventajas a la agricultura, con la creación de plantas que capten mejor la energía solar o que consuman menos nutrientes. El interés del análisis de la fotomorfogénesis supera, sin embargo, sus aplicaciones prácticas. No en vano la relación entre la luz y las plantas constituye uno de los aspectos más importantes y fascinantes de la vida de nuestro planeta, pues es la fuente primaria de oxígeno y constituye el primer eslabón de la red trófica.

Los efectos del espín en los gases

El núcleo atómico puede tener un espín y comportarse como una peonza. ¿Por qué ese espín, aislado del mundo exterior, puede alterar distintas propiedades de los gases?

Franck Laloë y Jack H. Freed

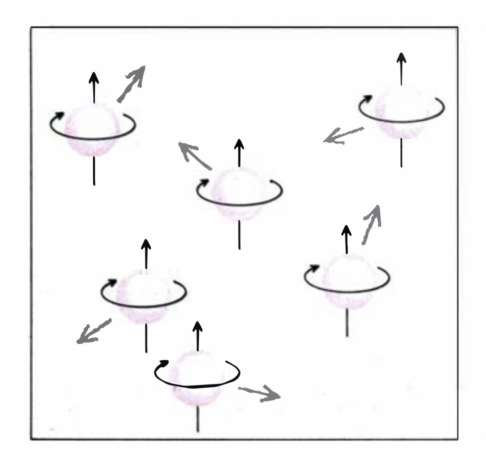
Desde hace tiempo, los gases de baja densidad, cuyos átomos se hallan muy separados unos de otros, han constituido un campo de trabajo muy fructífero para los físicos. En buena parte, la situación tiene que ver con la sencillez de ese medio. Puesto que los átomos sólo colisionan entre sí ocasionalmente, resulta fácil elaborar una interpretación teórica de las propiedades macroscópicas de dichos gases. La verdad es que nuestros conocimientos deben mucho al trabajo llevado a cabo, a finales del siglo XIX, por James Clerk Maxwell y Ludwig Boltzmann. Situación que contrasta con nuestro conocimiento de las propiedades de los líquidos y sólidos —constituidos por un elevado número de partículas, no muy distantes unas de otras y en mutua interacción constante— propiedades que siguieron envueltas en el misterio hasta que se desarrolló la mecánica cuántica a principios del siglo XX, y todavía persiste ese velo en algunas de ellas.

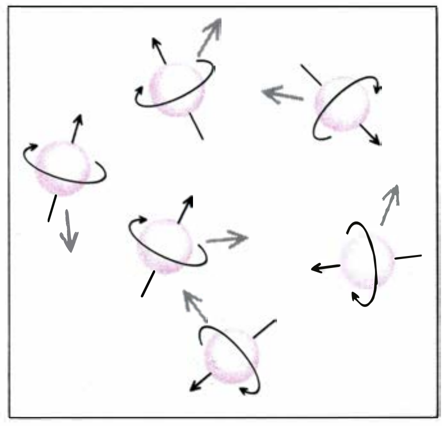
Ante la sencillez extrema de los gases de baja densidad, alguien pensaría que el interés de ese campo de investigación se ha agotado ya. Pero el trabajo reciente de numerosos físicos, entre los que nos incluimos los autores, demuestra que no es éste el caso. El estudio de los gases de baja densidad sigue proporcionando gran riqueza de fenómenos y muchas sorpresas. En particular, y bajo determinadas circunstancias, las propiedades macroscópicas de un gas constituido por átomos de hidrógeno o de helio pueden cambiar de forma espectacular en virtud de ciertos efectos mecánico-cuánticos.

De acuerdo con la teoría cuántica, el núcleo de un átomo se comporta como lo haría una peonza en rotación, que posee un momento angular alrededor de su eje de rotación. En otras palabras, se dice que el núcleo posee espín, o momento angular de espín. Si los átomos de un gas poseen su espín polarizado, de forma tal que los espines de todos los núcleos estén orientados en una misma dirección, la viscosidad del gas puede cambiar considerablemente y alterarse, por tanto, su capacidad para conducir el calor. Las correlaciones mecánico-cuánticas entre núcleos conocidas con el nombre de ondas de espín, que hasta ahora sólo se habían observado en ciertos líquidos y en los imanes entre los sólidos, pueden producirse también en los gases. Los cambios adquieren un valor suficiente para afirmar que los efectos mecánico-cuánticos han dado lugar a que el gas presente propiedades completamente nuevas.

No deja de resultar sorprendente, hasta cierto punto, que la polarización de los espines nucleares ejerza algún efecto sobre las propiedades macroscópicas de los gases, ya que los espines nucleares están muy débilmente acoplados con el mundo exterior. Pero las observaciones experimentales corroboran aquí la teoría. Por otro lado, como los gases dotados de espines polarizados son unos sistemas bastante simples, podemos describirlos mediante cálculos precisos realizados en el marco de principios fundamentales, algo que resulta imposible todavía en el caso de sólidos y líquidos.

En nuestro trabajo hemos utilizado dos tipos de gases: hidrógeno atómico y helio 3 (^{3}He). El hidrógeno atómico consta de un electrón unido a un núcleo, constituido por un protón. El gas hidrógeno existente en la naturaleza suele ser diatómico, compuesto por dos átomos de hidrógeno ligados (H^2). Los investigadores acaban de descubrir que se puede impedir la unión entre los átomos de hidrógeno, y preparar así muestras de hidrógeno atómico gaseoso, aprovechando los efectos de la polarización de los espines [véase "Estabilización del hidrógeno atómico", por Isaac F. Silvera y Jook Walraven, publicado en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1982]. Estas muestras gaseosas representan otro ejemplo importante del papel que los efectos mecánico-cuánticos pueden desempeñar en el dominio de lo macroscópico. Cuando abordemos los efectos generales del espín se entenderá cómo se ponen de manifiesto esos efectos.





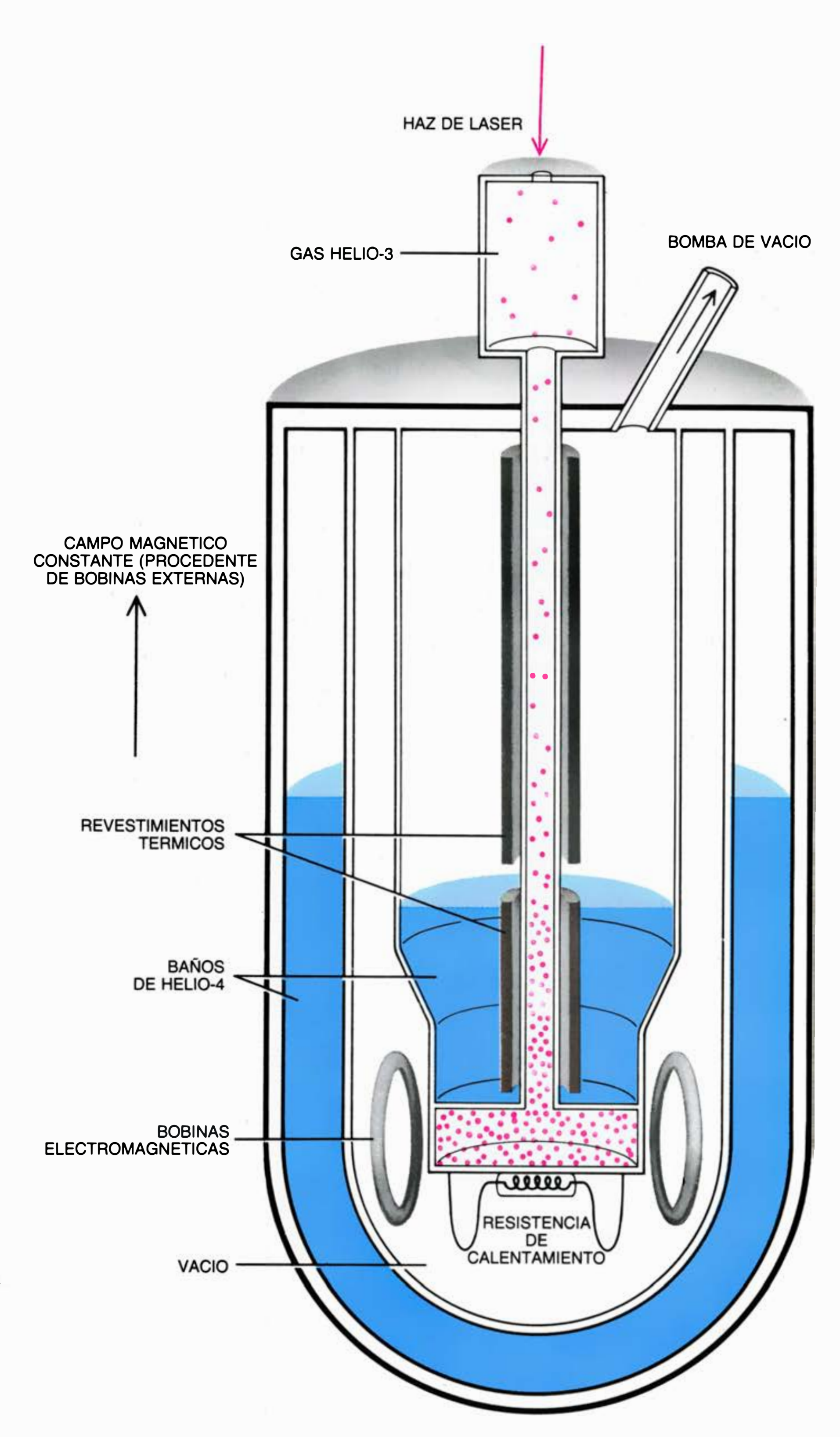
1. GAS DE ATOMOS, dotado de espines polarizados cuando los espines, o momentos angulares de espín, de los núcleos se alinean en una dirección (*izquierda*). Aquí los espines están orientados en la dirección "hacia arriba". Con el gas sin polarizar, los espines se hallan orientados en todas las direcciones (*derecha*).

El núcleo del otro gas con el que hemos trabajado, el helio 3, consta de dos protones y un neutrón. Dos electrones están ligados a este núcleo. Los átomos de helio son inertes (no reactivos) y, por tanto, no se forman nunca moléculas de helio 3. A temperaturas bajas —del orden de 3,2 grados Kelvin y a la presión atmosférica— el helio 3 atómico se torna líquido. Por su parte, el hidrógeno atómico es la única sustancia de la que se espera que pueda permanecer en estado gaseoso, incluso en el cero absoluto (cero grados Kelvin).

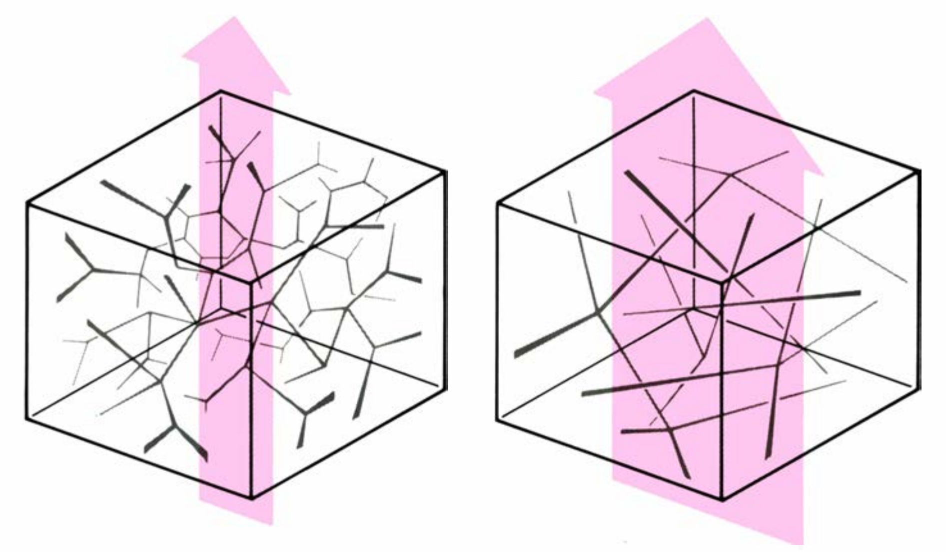
Tal como establece la teoría cuántica, existen importantes diferencias entre el comportamiento del hidrógeno atómico y el del helio 3. El hidrógeno atómico pertenece a una clase de partículas conocidas como bosones, mientras que el helio 3 pertenece a la clase de partículas denominadas fermiones. Las diferencias entre bosones y fermiones son considerables. Bajo ciertas condiciones, que ya precisaremos, los bosones tienden a acercarse entre sí, en tanto que los fermiones tienden a separarse. Este comportamiento es la base de los sorprendentes efectos que se observan en los gases con espines polarizados.

Que una partícula sea un bosón o un fermión depende de su espín. Según dijimos antes, los núcleos de los átomos poseen un espín. Y éste es una propiedad intrínseca de toda partícula. Puesto que todos los átomos son entidades compuestas, constituidas por un núcleo y uno o más electrones, tendrán en general un espín compuesto.

El espín de una partícula es parecido al espín de una esfera, pero entre uno y otro hay diferencias importantes. La dirección del espín de una esfera viene dada por la regla de la mano derecha: los dedos doblados señalan el sentido de giro de la esfera y el pulgar indica la dirección del espín. Aunque una partícula cuántica posea espín, no se puede decir que la partícula en cuestión gire en el espacio. Por otra parte, y a diferencia de lo que sucede con el giro de una esfera, cuyo momento angular puede tener cualquier valor, el espín de un átomo o de una partícula subatómica está cuantizado: la magnitud del espín sólo puede tomar un valor entero o semientero de la unidad fundamental del momento angular, conocida por constante de Planck. Así, el espín del protón, el neutrón y el electrón es de 1/2. El fotón, o cuanto de la radiación electromagnética, posee un espín de 1. Las partículas con un valor semientero



2. EFECTOS DE LA POLARIZACION DE LOS ESPINES sobre la conductividad térmica. Fueron medidos en la Escuela Normal Superior de París por un grupo de investigadores entre los que se incluía uno de los autores del artículo (Frank Laloë). Los espines de un gas de átomos de helio 3 se polarizan mediante un haz de luz láser circularmente polarizada; esta radiación inyecta un momento angular en la muestra. Los átomos con espines polarizados se mueven hacia abajo, a lo largo de un tubo de un metro de longitud, hasta llegar a una cámara que se mantiene a una temperatura de algunos grados Kelvin. La superficie inferior de la cámara presenta una resistencia adherida a ella. Cuando la atraviesa una corriente de intensidad conocida, se puede calentar el gas en una cuantía determinada. Si los espines del gas se encuentran polarizados, la diferencia de temperaturas entre las superficies superior e inferior es menor que si no lo están; el helio 3 dotado de espines polarizados conduce el calor mejor que el helio 3 sin polarizar. Las bobinas electromagnéticas que se encuentran a ambos lados de la cámara suministran un rápido impulso de campo magnético oscilante para destruir, de ese modo, la polarización y llevar luego a cabo mediciones comparativas.



3. AUMENTO EN LA CONDUCCION TERMICA del helio 3 con espines polarizados. Admite una interpretación en el marco de la mecánica cuántica. En el helio 3 ordinario, sin polarizar, los átomos colisionan y el recorrido libre medio —la distancia media recorrida por un átomo entre dos colisiones consecutivas— es bastante corto (*izquierda*). La conducción de calor se torna difícil (*flecha coloreada*). El aumento en la conducción térmica del helio 3 con espines polarizados débese a que sus átomos pertenecen a una clase de partículas conocidas por fermiones; de acuerdo con la mecánica cuántica, si un fermión ocupa un estado determinado, todos los otros fermiones idénticos quedan excluidos del mismo. (El estado de una partícula viene caracterizado por ciertas propiedades: energía, posición o momento y espín.) Si los espines de dos átomos de helio 3 son idénticos, dichos átomos no pueden encontrarse en un mismo punto del espacio: los átomos en cuestión tienden a evitarse mutuamente. Por tanto, los átomos de un gas de helio 3 con los espines polarizados se ignoran entre sí y el correspondiente recorrido libre medio tiende a infinito (*derecha*). Cuanto mayor sea el recorrido libre medio, tanto mayor será la eficacia con que los átomos "calientes" o rápidos transporten el calor de una región caliente a una región fría del gas: la conducción térmica aumenta mucho.

del espín (1/2, 3/2, 5/2, etcétera) se denominan fermiones, en honor del físico italiano Enrico Fermi. Las partículas cuyo espín adquiere valores enteros (0, 1, 2, 3, etcétera) se denominan bosones, en homenaje a S. N. Bose.

Para determinar el espín de una entidad compuesta, pensemos en un núcleo o un átomo, debe llevarse a cabo la suma vectorial de los espines de sus componentes. (Un vector es una magnitud que posee un valor y una dirección.) Puesto que el núcleo del átomo de hidrógeno consta de un solo protón, su espín valdrá 1/2. El espín del núcleo helio 3, constituido por tres componentes cuyos espines son 1/2, resulta ser también de 1/2. El espín del átomo de hidrógeno tiene un valor entero (0 o 1), porque el espín del núcleo atómico, 1/2, y el espín del electrón, 1/2, se "suman" vectorialmente; cabe, pues, esperar que el átomo de hidrógeno se comporte como un bosón compuesto. Por otra parte, el átomo de helio 3 contiene dos electrones de espín 1/2; por tanto, el espín total del átomo presentará siempre un valor semientero (1/2 o 3/2). El helio 3 se comporta como un fermión compuesto.

Una de las propiedades más fascinantes de los bosones y fermiones es la siguiente: esas partículas no cumplen determinadas predicciones de la física clásica. De acuerdo con la teoría clásica, podemos distinguir siempre unas partículas de otras. Sin embargo, la mecánica cuántica establece que las partículas idénticas con espines idénticos son, en realidad, indistinguibles: ninguna medición permite determinar quién es quién. Las partículas indistinguibles muestran importantes efectos no clásicos cuando se produce una colisión. La naturaleza de tales efectos depende de que las partículas en cuestión sean fermiones o bosones.

El comportamiento de los fermiones se funda en el principio de exclusión de Pauli. Así llamado en honor del físico austriaco Wolfgang Pauli, este principio mecánico-cuántico establece que, si un fermión ocupa cierto estado, todos los fermiones idénticos a éste quedan excluidos de dicho estado. El estado de una partícula especifica todas sus características: energía, posición o momento y espín. En virtud del principio de exclusión de Pauli, si dos electrones están, por ejemplo, en un mismo estado de espín, no pueden encontrarse en un mismo punto del espacio. Tal como hemos dicho, bajo estas condiciones los dos electrones tienden a evitarse. (La repulsión electrostática, que tiende también a mantener separados a los dos electrones, es una noción distinta, aunque importante.) El principio de exclusión, aplicado a los electrones de los átomos, impone las propiedades de todos los elementos, cada uno de los cuales posee una configuración electrónica estable y propia.

Aclaremos qué hay que entender por el neologismo "indistinguibilidad" en una colisión entre dos fermiones. En principio, es posible observar las trayectorias de los dos fermiones cuando se aproximan entre sí. La colisión altera sus direcciones; vemos, entonces, sus trayectorias cuando se alejan uno de otro. Si dos fermiones coinciden en el mismo estado de espín, no nos es posible distinguir cuál es cada uno. Pero si las dos partículas tienen espines diferentes, pueden distinguirse midiendo las direcciones de éstos (al menos en principio). Esto nos permitiría determinar el recorrido completo de cada uno de los fermiones, es decir, averiguar quién es cada uno. (La misma afirmación se puede aplicar a la colisión entre dos bosones.) Se sabe que la tendencia de dos fermiones indistinguibles a evitarse mutuamente afecta a la forma en que estas partículas entran en interacción durante una colisión.

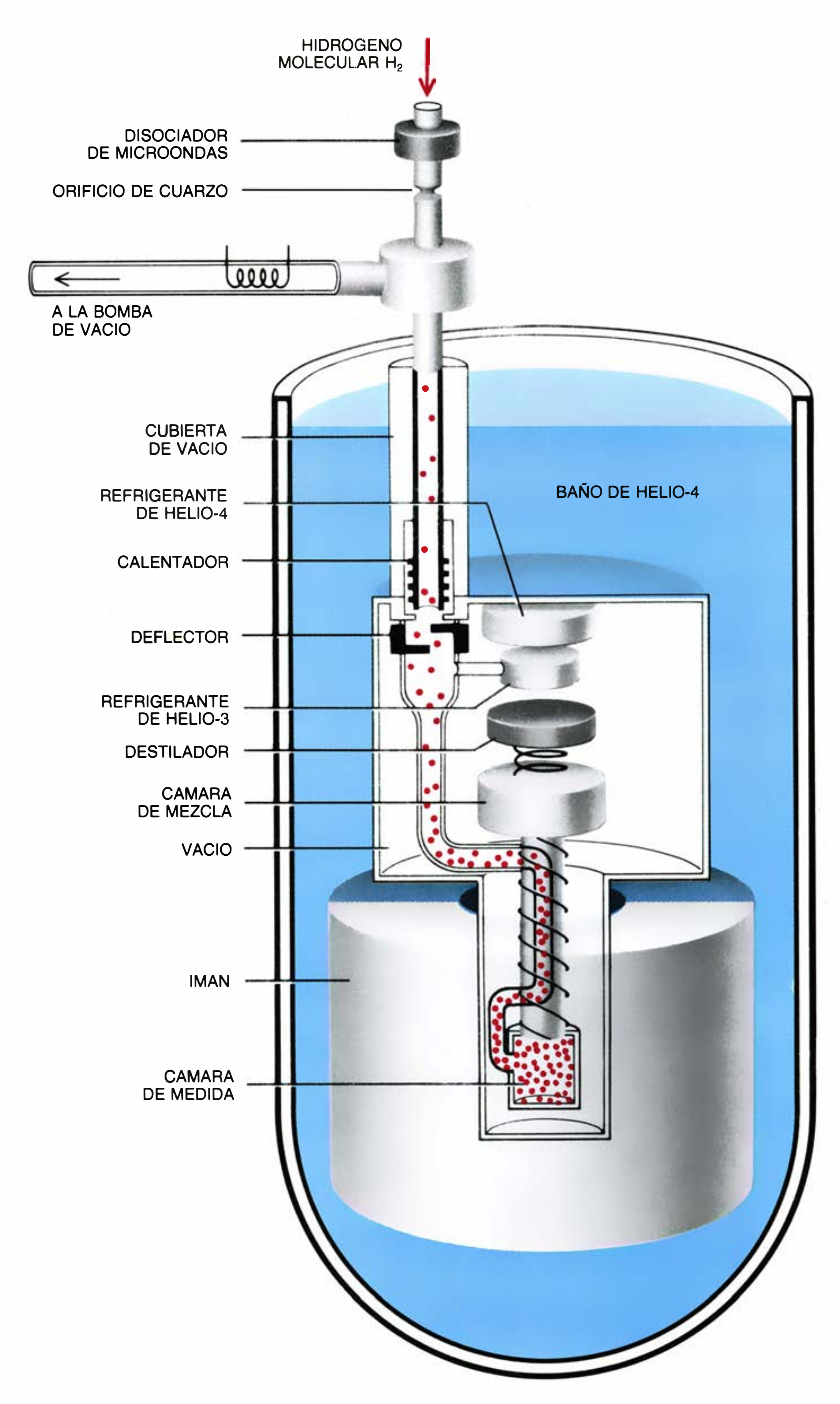
Los bosones no cumplen el principio de exclusión. No existe ningún límite sobre el número de bosones que ocupen el mismo estado cuántico. Si dos bosones simples, los fotones, por ejemplo, tienen espines idénticos —y son, por tanto, indistinguibles— tienden a aproximarse entre sí con mayor facilidad que dos partículas distinguibles. Los bosones compuestos, tales como los átomos de hidrógeno, con espines de electrón idénticos mostrarán un efecto similar cuando sus espines nucleares sean los mismos.

Se recurre al principio de exclusión para impedir la combinación de átomos de hidrógeno que forme hidrógeno molecular (H_2) cuando entran en colisión. En realidad, aunque el átomo de hidrógeno es un bosón compuesto, el protón y el electrón que lo constituyen son fermiones y, por tanto, obedecen el principio de exclusión. Los espines de los electrones atómicos del hidrógeno gaseoso no polarizado están orientados al azar en todas las direcciones del espacio. (Bajo la acción de un campo magnético externo, los espines se orientan únicamente en una de las dos direcciones posibles, "arriba" o "abajo".) Dos electrones con el mismo estado de espín son indistinguibles y tenderán a evitarse. Si cada uno de estos electrones forma parte de un átomo de

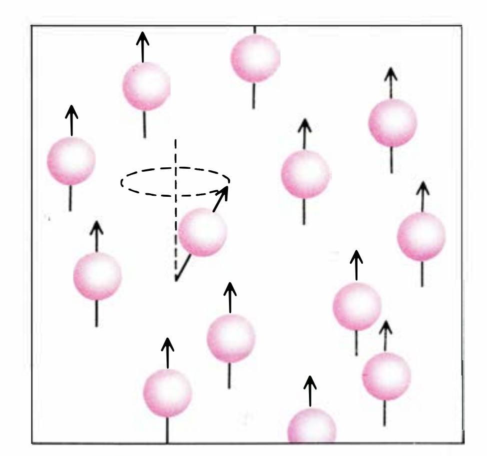
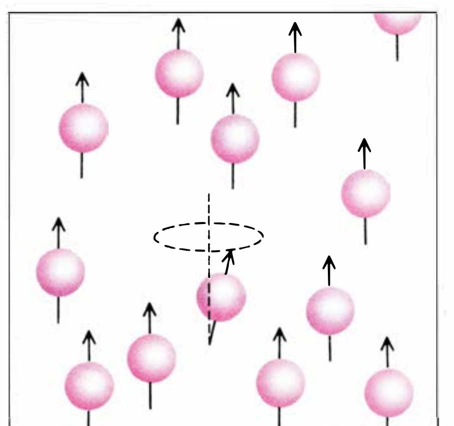
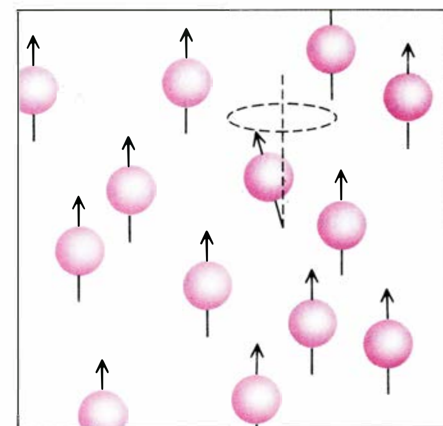
hidrógeno, ello impedirá el restablecimiento de un enlace químico entre los dos átomos. Sin embargo, si los espines de los electrones están orientados en direcciones diferentes, los dos electrones son distinguibles y ningún principio cuántico les impide estar en el mismo lugar al mismo tiempo. Si cada uno de estos electrones forma parte de un átomo de hidrógeno, resulta energéticamente más favorable para los dos átomos enlazarse que permanecer separados. Y así se crea una molécula de hidrógeno.

Supongamos ahora que la muestra gaseosa de hidrógeno está polarizada: los espines de todos los electrones se hallan orientados en una misma dirección. En ese caso, todos los electrones son indistinguibles y tienden a evitarse. Por consiguiente, los átomos de hidrógeno no se aproximan, ni se enlazan entre sí durante una colisión: al contrario, se alejan mutuamente. Bajo estas condiciones, el hidrógeno atómico es estable y no se forma hidrógeno molecular. A lo largo de estos últimos años, varios laboratorios de todo el mundo han producido hidrógeno atómico estabilizado polarizando los espines de los electrones.

En el curso de nuestro trabajo, nos hemos preguntado qué sucedería si los espines nucleares del hidrógeno atómico y del helio 3 estuvieran polarizados. (Los átomos de hidrógeno están "doblemente polarizados": tanto el electrón como el núcleo se encuentran polarizados. En el estado fundamental del helio 3 es necesario preocuparse por la polarización de los electrones: los espines de los dos electrones que constituyen el átomo se hallan en estados opuestos y, por tanto, el espín resultante de los electrones vale cero.) Los efectos de la polarización de los espines nucleares son importantes; por una razón especial: el pequeño campo magnético asociado con un espín nuclear es virtualmente independiente del medio que rodea al átomo. La causa del aislamiento del espín nuclear respecto del mundo exterior estriba en la intensidad del campo magnético asociado con él, que es unas 1000 veces menor que la del campo magnético asociado con el espín de cada uno de los electrones que constituyen el átomo. Desde luego, los efectos de la polarización del espín nuclear no guardan relación con los campos magnéticos asociados con los espines nucleares. Los espectaculares cambios que se observan en las propiedades macroscópicas



4. ONDAS DE ESPIN, así se llama el fenómeno observado en la Universidad de Cornell por un grupo de investigadores entre los que se incluía uno de los autores de este artículo (Freed). Una onda de espín de un gas polarizado consiste en un modo oscilatorio colectivo de los espines de los núcleos: los espines realizan un movimiento de precesión, con respecto a la dirección media de polarización, con una frecuencia que depende de la cuantía de la polarización. Para estudiar esas ondas, se comienza por disociar las moléculas de hidrógeno (H_2) en átomos de hidrógeno mediante el bombardeo con radiación de microondas. Luego, los átomos se enfrían y sus espines son polarizados, llenando una cámara pequeña sometida a un campo magnético intenso. Las ondas de espín se provocan mediante una técnica de resonancia magnética nuclear (RMN) pulsante, en la que se recurre a un impulso corto de ondas de radio para inclinar los espines nucleares en un pequeño ángulo respecto de su dirección inicial; de ese modo, se produce posteriormente un movimiento de precesión de los espines respecto de la dirección del campo magnético estático con una frecuencia proporcional a la intensidad de dicho campo. El giro de los espines origina una magnetización rotatoria que es transversal, o perpendicular, a la dirección principal de polarización. Esta magnetización transversal produce una diferencia de potencial que se amplifica, se detecta y se analiza mediante su espectro de frecuencias.

5. ORIGEN DE LAS ONDAS DE ESPIN en el marco de la mecánica cuántica. A esa misma luz se explican los espectaculares cambios que se producen en la conducción térmica. Imaginemos que, en un conjunto de átomos con espines hacia arriba, se introduce un átomo de prueba cuyo espín esté inclinado respecto de los demás (*izquierda*). Cuando el átomo de prueba colisiona con cualquier otro, la cuantía de dicha inclinación permanecerá virtualmente inalterada, pero el espín de prueba girará ligeramente alrededor del eje vertical (*centro*). El efecto de las sucesivas colisiones sobre el espín de prueba será casi idéntico al citado. En virtud de los choques aleatorios entre átomos, acabará por producirse una rotación acumulativa del espín de prueba alrededor del eje vertical (*derecha*).

de los gases son una consecuencia de la descripción mecánico-cuántica de partículas idénticas.

Conviene resaltar que todo nuestro trabajo se ha realizado a temperaturas muy bajas, a escasos grados por encima del cero absoluto. Las bajas temperaturas son necesarias ante la dualidad onda-partícula de la materia y la radiación. Toda partícula porta asociada cierta longitud de onda, conocida por longitud de onda de De Broglie, cuyo valor es inversamente proporcional al momento de la partícula. Cuanto menor es la temperatura, tanto mayor es la longitud de onda de De Broglie, porque, en dichas condiciones, la partícula se mueve más despacio y su momento es menor. En virtud del principio de exclusión de Pauli, dos fermiones que se hallen en el mismo estado de espín no pueden aproximarse a una distancia menor que la longitud de onda de De Broglie. Para que los efectos cuánticos relacionados con la indistinguibilidad adquieran suficiente entidad, la longitud de onda de De Broglie debe ser mayor que el alcance de las fuerzas entre los átomos. Para que la longitud de onda de De Broglie aumente, debe disminuir la temperatura.

El efecto de la polarización del espín sobre la conducción del calor no encierra especial dificultad. Supongamos que los espines nucleares de un gas de átomos de helio 3 están polarizados y que la muestra se mantiene a una temperatura baja, a un grado Kelvin. Si el helio 3 gaseoso se mantiene en tales condiciones, los átomos que posean el mismo espín se ignorarán mutuamente ya que el helio 3 es un fermión; ahora bien, los átomos cuyos espines difieran, colisionarán e interaccionarán entre sí. Por el contrario, en el caso del helio 3 gaseoso polarizado, todos los átomos se ignorarán casi por completo y las colisiones serán mucho menos frecuentes. Todo sucede como si una polarización nuclear completa "desconectara" las interacciones entre átomos.

La desconexión de las interacciones atómicas produce cambios significativos en el recorrido libre medio; por tal magnitud física se entiende la distancia media que un átomo de un gas recorre entre dos colisiones consecutivas. En un gas ideal, los átomos no experimentan interacciones mutuas, por lo que su recorrido libre medio sería infinito. Al ignorarse unos a otros, los átomos se moverán en línea recta directamente de una pared a otra del recinto que los contiene. En los gases reales, los átomos colisionan y su comportamiento se aproxima al ideal sólo en el límite de una dilución infinita. A pesar de ello, una muestra de gas helio 3 polarizado a temperaturas extremadamente bajas se desenvuelve como un gas ideal. Bajo dichas condiciones, el helio 3 se comporta como un gas ideal "artificial" y la longitud de su recorrido libre medio se aproxima al infinito. Efectos similares fueron predichos en 1977 por dos físicos soviéticos, E. P. Bashkin y A. Meyerovich, del Instituto de Problemas Físicos S. I. Vasilov, para soluciones diluidas de helio 3 líquido en helio 4 superfluido, un sistema que resulta ser muy similar a un gas en muchos sentidos. (El núcleo del helio 4, más abundante en la naturaleza que el de helio 3, está constituido por dos protones y dos neutrones; un superfluido es capaz de fluir sin encontrar resistencia.)

Entre las propiedades físicas que dependen del recorrido libre medio se incluye la capacidad de los gases para conducir calor. Si dos paredes de un recipiente lleno de gas se mantienen a temperaturas diferentes, el calor que fluye a través del sistema es proporcional al recorrido libre medio del gas: cuanto mayor es dicho recorrido libre medio, tanto mayor será el rendimiento con que los átomos "calientes" o rápidos transporten su energía de la pared caliente a la pared fría. En consecuencia, la conductividad térmica de un gas polarizado de helio 3 a temperaturas bajas sería mucho mayor que la de su equivalente no polarizado; dicha conductividad se acercaría a infinito a medida que el recorrido libre medio tendiera también a infinito. La viscosidad del gas aumentaría por motivos similares, aunque la interpretación de este efecto no es tan inmediata como la anterior.

Los efectos debidos a la polarización de los espines nucleares de los átomos de hidrógeno son precisamente los opuestos. La explicación se encuentra en los propios átomos de hidrógeno: son bosones (recordemos que estos bosones están constituidos por dos fermiones); por tratarse de partículas idénticas, tienden a acercarse entre sí con mayor facilidad. La polarización de los espines nucleares daría lugar a una disminución del recorrido libre medio y disminuiría tanto la viscosidad como la conductividad térmica de este gas. Sin embargo, incluso en una muestra no polarizada, los bosones son virtualmente libres para interaccionar entre sí; en consecuencia, los efectos de la polarización resultarán menos pronunciados que los observados en el caso de

los fermiones y su investigación experimental revestirá menos interés.

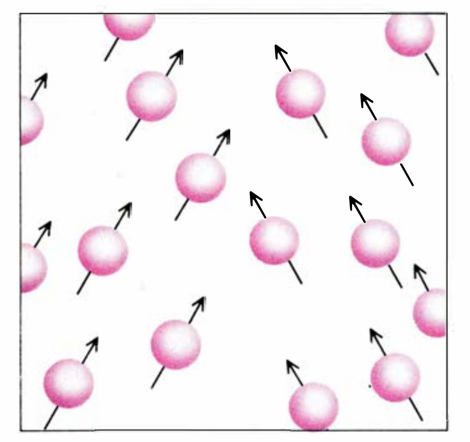
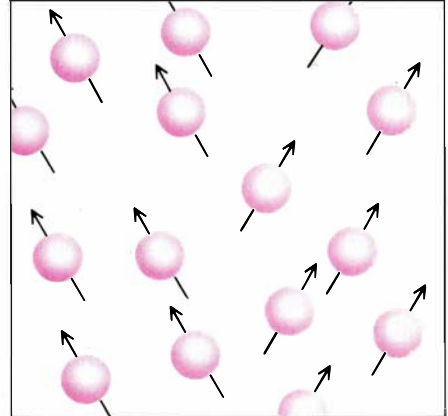
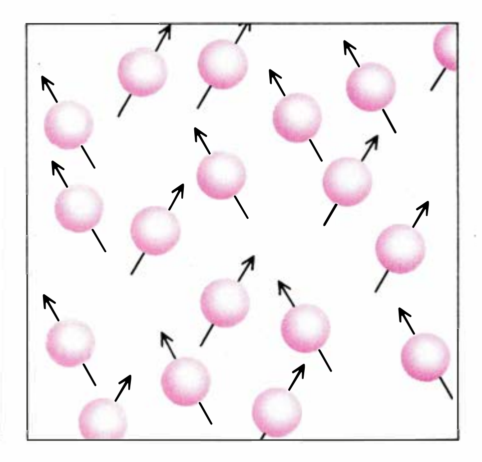
El efecto de la polarización del espín sobre la conducción térmica del helio 3 gaseoso fue observado y medido por un grupo de investigadores formado, entre otros, por Pierre-Jean Nacher, Geneviève Tastevin, Michèle Leduc, Stuart B. Crampton, David S. Betts, James M. Daniels y uno de los autores de este artículo (Laloë) en la Escuela Normal Superior de París. Había que empezar por polarizar los núcleos de helio. Para conseguirlo, se utilizó la técnica del bombeo óptico con láser. El bombeo óptico es un proceso, inventado en 1950 por Alfred Kastler durante su paso por la Escuela Normal, en el que un haz de luz circularmente polarizada (luz en la que el campo eléctrico asociado gira con respecto a la dirección de avance) se utiliza para inyectar un momento angular en un gas atómico y polarizar sus espines. Aunque muchos átomos se pueden polarizar así, el helio planteaba algunas dificultades específicas, que fueron resueltas, en 1963, en la empresa Texas Instruments, por Forrest D. Colegrove, Laird D. Schearer y G. King Walters, utilizando un método que Leduc y sus colaboradores perfeccionaron después en la Escuela Normal.

El segundo problema consistía en producir la polarización de los núcleos en un gas frío, a temperaturas de algunos grados Kelvin, es decir, bajo las condiciones en las que adquieren relevancia los efectos cuánticos. Este problema se resolvió en la Escuela Normal utilizando la cámara doble. Se trata de un recipiente constituido por dos cámaras: una de ellas se mantiene a temperatura ambiente y, la otra, a bajas temperaturas. En la primera de ellas, los núcleos de helio se polarizan por bombeo óptico; en la segunda, se acometen las mediciones correspondientes. Las dos partes se hallan conectadas entre sí, mediante una conducción de un metro de longitud, en la que los átomos se difunden bajo los efectos de su movimiento térmico aleatorio. La difusión transfiere la polarización desde el recinto que se encuentra a temperatura ambiente hasta el recinto sometido a temperatura baja. Para reducir al mínimo la interacción entre los átomos y la cámara fría y su deposición sobre ella, se recubren las paredes de la cámara con hidrógeno molecular sólido.

La cámara de medición tiene forma cilíndrica, con una altura de un centímetro y un diámetro de algunos centímetros. La superficie plana superior está en contacto con un baño de helio 4, que actúa de refrigerante. La temperatura de este baño se puede ajustar entre uno y cuatro grados Kelvin. La superficie plana inferior tiene una resistencia unida a ella y está en contacto con el vacío. Cuando una corriente eléctrica de intensidad conocida atraviesa la resistencia, se produce el paso de una cantidad de calor a través del gas. Basta calcular la diferencia de temperaturas entre las dos superficies planas para averiguar el coeficiente de conductividad térmica del gas.

El experimento consiste en registrar la diferencia de temperaturas que se produce cuando la cámara está llena de helio 3 con los espines polarizados y se aplica un impulso rápido de un campo magnético oscilante con el fin de anular bruscamente dicha polarización. El cambio de la polarización nuclear provocará un cambio macroscópico en la temperatura del gas; la diferencia de temperaturas entre la superficie superior e inferior de la cámara resulta menor cuando el gas está polarizado. El cambio observado concuerda con el predicho, y pone de relieve las implicaciones de la teoría cuántica en este fenómeno.

Expusimos más arriba que los efectos cuánticos de la polarización de los espines nucleares de un gas no se limitaban a la conducción térmica. En realidad, se había observado antes otro fenómeno: las ondas de espín. Estas ondas se originan en la interacción cooperativa de las partículas con espín; se las conoce mejor por el papel que desempeñan en los imanes permanentes. En éstos, un número muy elevado de electrones presentan sus espines en la misma dirección. Dado que cada uno de los espines electrónicos se comporta como un pequeño imán, el efecto acumulativo de dicha disposición produce una magnetización permanente en el material. Supongamos ahora (con la ayuda de un campo magnético externo si fuera necesario) que los espines de todos los electrones se orientan en una misma dirección (por ejemplo, hacia arriba), salvo uno, que lo está en dirección opuesta (hacia abajo). Este único espín hacia abajo, que puede imaginarse como "una excitación de espín hacia abajo", se propaga rápidamente a lo largo del imán: al interaccionar con los espines de los electrones próximos, la excitación del espín hacia abajo "aletea" por todo el imán. Esta deslocalización constituye un ejemplo sencillo de una onda de espín.

6. FORMACION DE LAS ONDAS DE ESPIN de una muestra gaseosa cuando los espines de los núcleos presentes en una región de la muestra se hallan inclinados en una cuantía diferente de la que lo están los espines de los núcleos de otra región (*izquierda*). La magnetización transversal de cada región se puede propagar coherentemente a lo largo de la muestra por efecto acumulativo de las sucesivas colisiones de los átomos, comportamiento que constituye las ondas de espín (*centro*). Esos movimientos térmicos al azar que crean las ondas de espín, las destruyen; dichos movimientos transfieren átomos al azar desde una región donde la magnetización transversal señala en una dirección hasta otra región donde dicha magnetización señala en una dirección diferente (*derecha*).

No es ése exactamente el origen de las ondas de espín en un gas, por cuanto los átomos no yacen fijos, sino que se encuentran en un movimiento incesante en todas direcciones. Por otra parte, las ondas de espín observadas guardan relación con los espines de los núcleos atómicos, que se hallan muy bien resguardados del mundo exterior. ¿Cómo es posible que las colisiones que se producen de una manera aleatoria y de vez en cuando en un gas promuevan correlaciones entre los espines de tantos átomos y originen las ondas de espín?

La respuesta la posee, de nuevo, el comportamiento cuántico de las partículas idénticas. Tal como hemos indicado antes, el resultado de una colisión entre dos átomos idénticos depende de las direcciones de los espines de sus núcleos, incluso en el caso de que las fuerzas responsables de la interacción entre los dos átomos no tengan nada que ver con los espines nucleares. Supongamos, por ejemplo, que en un sistema de átomos idénticos con espines hacia arriba se introduce un átomo de prueba cuyo espín esté ligeramente inclinado respecto de los espines nucleares del conjunto. (Dicho espín se puede expresar mediante la suma vectorial de un estado de espín hacia arriba y una pequeña cantidad de un estado de espín hacia abajo.) Cuando el átomo de prueba colisiona con cualquier átomo de los presentes, la cuantía de la inclinación hacia abajo permanecerá casi inalterada, pero el espín de prueba girará ligeramente respecto al eje vertical. (Este hecho débese a que, en una colisión con un átomo con espín hacia arriba, la parte de espín hacia arriba del átomo de prueba es indistinguible, en tanto que la parte con espín hacia abajo sí es distinguible.) El efecto sobre el espín de prueba en las colisiones subsiguientes será casi idéntico, porque las colisiones se producen siempre con átomos con espines hacia arriba; así, pues, las colisiones al azar entre los átomos producirán una rotación acumulativa resultante del espín de prueba alrededor del eje vertical.

Supongamos ahora que los espines nucleares de una región de la muestra están inclinados en una cuantía diferente respecto de los espines nucleares de otra región. El efecto macroscópico de inclinar los espines de una región de la muestra se manifiesta, ante todo, en la creación de cierta magnetización en una dirección que es transversal, o perpendicular, a la dirección principal de polarización. La magnetización transversal se transmite coherentemente a lo largo de la muestra por efecto acumulativo de las colisiones sucesivas entre los átomos. Los espines tienden a girar respecto a la dirección media de polarización con una frecuencia que depende de la cuantía de la polarización. Este modo de oscilación colectiva de un gas se denomina onda de espín. Cuanto más resaltados se hallan los efectos cuánticos, tanto más rápida es la oscilación.

Los movimientos térmicos que crean las ondas de espín de los gases en las colisiones al azar ofrecen especial interés: son también responsables de la destrucción de dichas ondas. Por lo común, una muestra gaseosa que contenga ondas de espín presenta varias regiones con magnetizaciones transversales diferentes. Los movimientos térmicos de los átomos se transfieren ocasionalmente a otros átomos por un proceso de difusión desde una región con una cierta dirección de magnetización hacia otra región cuya dirección de magnetización es diferente. Con el tiempo, la mezcla de todas estas regiones igualará las direcciones de magnetización transversales, de suerte que en la muestra no habrá ya una dirección de magnetización privilegiada. La efectividad con que estas ondas de espín se transmiten en un gas, frente al proceso de igualación al azar de la magnetización transversal que se produce en virtud de los movimientos térmicos, es proporcional a la longitud de onda de De Broglie e inversamente proporcional al alcance de la interacción entre átomos (multiplicada por la magnitud y dirección de la polarización de los espines nucleares).

La detección de las ondas de espín en los gases se llevó a cabo en la Universidad de Cornell; en ella intervinieron, entre otros, Burgess R. Johnson, John S. Denker, Nicholas P. Bigelow, Laurent P. Levy, David M. Lee y uno de los autores del artículo (Freed). Se utilizaba hidrógeno atómico gaseoso, por mor de su masa, que es mínima, lo que suponía una longitud de onda de De Broglie máxima. Esta circunstancia posibilitaba una máxima eficacia en la transmisión de las ondas de espín frente al proceso de difusión al azar. El gas se producía disociando hidrógeno molecular con radiación de microondas. Los átomos de hidrógeno atravesaban luego un tubo revestido con teflón (el mismo material antiadherente que sirve para recubrir muchas sartenes y útiles de cocina) y, después, una sección de baja temperatura del tubo, con una película de helio 4 superfluido. Los revestimientos de teflón y de helio líquido habían de reducir al mínimo la recombinación de los átomos de hidrógeno que originara hidrógeno molecular sobre las paredes del tubo; el hidrógeno atómico no se adhiere a esos revestimientos con la facilidad con que lo hace con otros materiales.

El gas de hidrógeno atómico penetraba a continuación en una cámara cuyo volumen era de 0,3 centímetros cúbicos y su temperatura extremadamente baja (décimas de grado por encima del cero absoluto). Esta cámara se encontraba sometida a un campo magnético intenso, que atraía a los átomos cuyos espines atómicos eran antiparalelos respecto al campo (espines hacia abajo) y repelía a los átomos cuyos espines atómicos fueran paralalelos a dicho campo (espines hacia arriba). En virtud de ese proceso, la cámara sólo contenía átomos con espines de los electrones hacia abajo. En otras palabras, los electrones de la muestra gaseosa poseían el espín polarizado. Según se explicó antes, el hidrógeno molecular no se formaría a partir de un gas como éste. En consecuencia, el hidrógeno atómico se había estabilizado.

Ahora bien, los espines nucleares de los átomos de hidrógeno podían ser paralelos o antiparalelos con respecto a los espines de los electrones polarizados. Los átomos cuyos espines nucleares fueran antiparalelos —es decir, hacia arriba— se despolarizaban ligeramente, se recombinaban entre sí y se depositaban sobre las paredes de la cámara, con lo cual se iba creando poco a poco una capa de hidrógeno molecular sólido. Al cabo de pocos minutos, la cámara contenía sólo átomos doblemente polarizados, es decir, átomos cuyos espines nucleares fueran paralelos a los espines de los electrones. (Ambos espines eran antiparalelos respecto al campo magnético.) Thomas J. Greytak y Daniel Kleppner, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, fueron los primeros en estudiar este efecto.

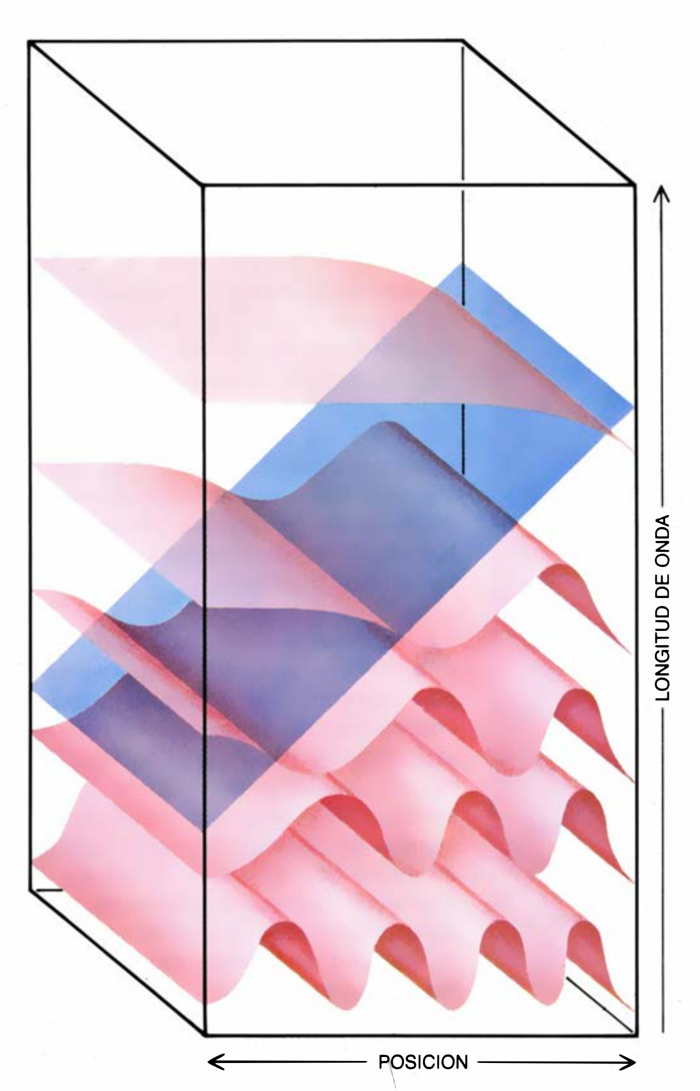
Haciendo uso de la técnica de resonancia magnética nuclear pulsante (RMN) se ha conseguido que los núcleos atómicos polarizados presenten ondas de espín. Esta técnica, desarrollada por los investigadores de la Universidad de Cornell, consiste en utilizar un impulso corto de ondas de radio para inclinar los espines nucleares en un pequeño ángulo respecto de su dirección inicial; dichos espines realizan así un movi-

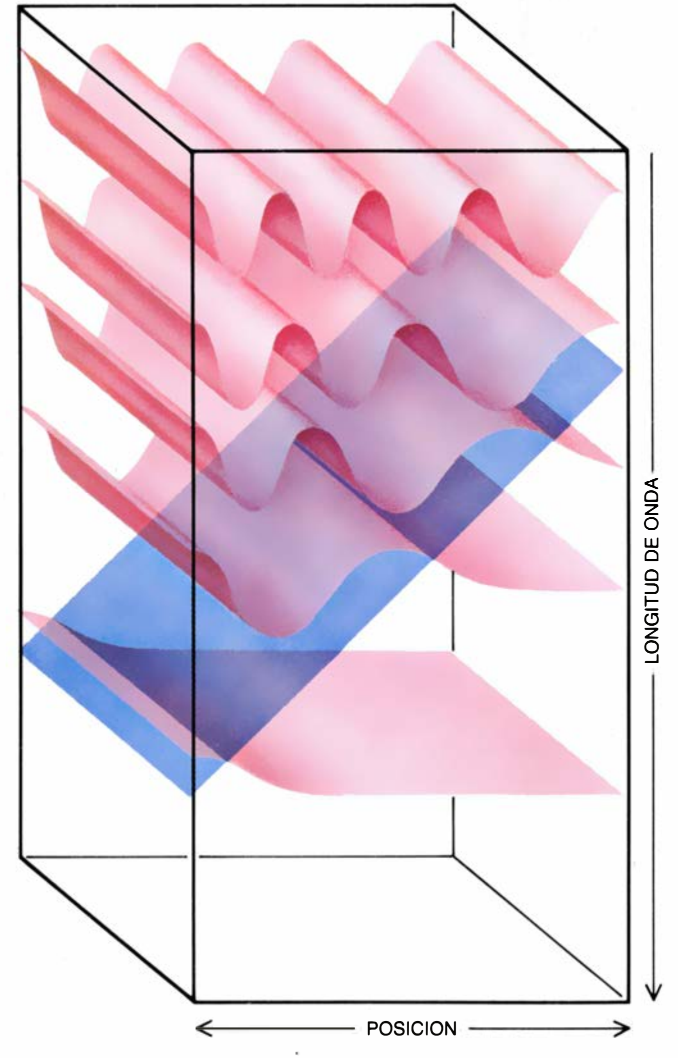
miento de precesión respecto del campo magnético estacionario con una velocidad angular proporcional a la intensidad de dicho campo. La precesión de los espines crea una magnetización transversal rotatoria, dando lugar a la producción de un voltaje susceptible de amplificarse, detectarse y analizarse luego a través de su espectro de frecuencias.

Una característica importante del experimento de Cornell consiste en la aplicación de un campo magnético de gradiente constante superpuesto al campo magnético estacionario: la intensidad del campo resultante es baja en uno de los extremos de la cámara y aumenta linealmente a lo largo de la misma hasta el otro extremo, donde la intensidad resulta elevada. En virtud de ello, la velocidad de precesión de los espines nucleares respecto del campo aplicado varía con los distintos lugares de la cámara. Normalmente, las diversas frecuencias de rotación de los espines nucleares en los diferentes puntos de la cámara dan lugar a un espectro de frecuencias que dibuja una línea de resonancia ancha. Este espectro característico se utiliza en otras aplicaciones de la RMN para obtener imágenes espaciales de los materiales implicados y sirve de base para la técnica de producción de imágenes por resonancia magnética que se usa en los hospitales. Lo peculiar del experimento de Cornell reside en la presencia de una serie de picos de resonancia estrechos y prominentes, superpuestos a la línea de resonancia ancha. Estos picos corresponden a los modos de las ondas de espín propios de la cámara utilizada.

El gradiente del campo magnético produce también otro efecto notable. Nos evoca el principio de incertidumbre de Heisenberg, según el cual no puede determinarse a la vez la posición y el momento de una partícula cuántica. Por imperativo del principio de incertidumbre, si se intenta medir la posición de una partícula, la propia acción medidora alterará el estado de la partícula de suerte tal que después de la medición dicha partícula estará más localizada en el espacio.

De forma análoga, las ondas de espín de la cámara se localizan en el espacio al aplicar el gradiente de campo para determinar su ubicación. En ausencia





7. ANALOGIA CON EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE de Heisenberg. Ese paralelismo se produce en el gas de hidrógeno atómico con los espines polarizados. El principio de incertidumbre de Heisenberg establece que la posición y el momento de una partícula cuántica no se pueden medir simultáneamente: cuando se intenta medir la posición de una partícula, la acción de medir cambiará el estado de la partícula, hasta el punto de que después de la medición la partícula estará más localizada en el espacio. De modo parecido, las ondas de espín en una cámara de medición quedan localizadas al introducir dicha cámara en un campo magnético con gradiente constante; la intensidad de dicho campo es baja en uno de los lados de la cámara y aumenta linealmente a lo largo de ella hasta el lado opuesto, donde es elevada. El gradiente localiza las ondas de espín en uno de los dos lados de la cámara; ello depende, en parte, de que tales ondas de espín se hallen asociadas con fermiones de espín polarizado o con bosones. Las ondas de espín asociadas con átomos de hidrógeno doblemente polarizados, que se comportan como si fueran bosones compuestos, quedarán atrapadas en el lado de la cámara donde la intensidad del campo es alta (*izquierda*). Por contra, si las partículas se desenvuelven como fermiones, las ondas de espín quedarán atrapadas en el lado de la cámara de baja intensidad (*diagrama de la derecha*).

del gradiente de campo, las ondas están deslocalizadas; en presencia de dicho gradiente, las ondas de espín se hallan localizadas en uno de los dos lados de la cámara. El gradiente de campo atrapa las ondas de espín y permite su detección mediante la técnica de RMN.

Las ondas de espín quedan atrapadas en el lado de la cámara donde la intensidad del campo magnético resultante es baja o en el lado donde dicha intensidad es elevada. Uno de los factores responsables de esa determinación es el comportamiento de los átomos de la muestra gaseosa: es decir, según actúen como fermiones o como bosones. De acuerdo con la teoría, desarrollada sobre todo por Levy y Andrei E. Ruckenstein en Cornell, las ondas de espín asociadas con los átomos de hidrógeno doblemente polarizados, que suelen desenvolverse como bosones compuestos, deberían quedar atrapadas en el lado de la cámara donde es más alta la intensidad del campo. Los datos experimentales corroboran la teoría y confirman que, bajo condiciones adecuadas, los átomos de hidrógeno se comportan como bosones compuestos.

Una consideración final. Se ha observado la existencia de ondas de espín en el helio 3 gaseoso. El trabajo correspondiente fue llevado a cabo en la Escuela Normal. Aunque las ondas de espín no resultan tan espectaculares como las del hidrógeno atómico, su existencia resulta inegable. Las observaciones experimentales corroboran las predicciones teóricas de Claire Lhuillier de la Escuela Normal y de uno de los autores (Laloë).

A medida que se van realizando nuevos experimentos con gases de espín polarizado, se robustece más el convencimiento de que las técnicas desarrolladas en el trabajo con gases conducirán a aplicaciones prácticas. En ese sentido, varios grupos han utilizado ya algunas de estas técnicas para fabricar un nuevo tipo de máser de átomos de hidrógeno a bajas temperaturas; este dispositivo podría convertirse en un reloj atómico de finísima precisión. Los físicos nucleares están trabajando en el uso de helio 3 polarizado como blanco para las colisiones de partículas. Sin embargo, parece probable que el papel principal de los gases con espines polarizados continuará siendo el de ofrecer la posibilidad de investigar, desde los principios básicos, una amplia variedad de fenómenos cuánticos, incluidos fenómenos hidrodinámicos del mayor interés.

El comportamiento de las ballenas

Estos mamíferos marinos presentan comportamientos sociales y alimentarios que recuerdan los de los herbívoros terrestres de los que evolucionaron hace alrededor de 55 millones de años

Bernd Würsig

Hace más de 50 millones de años, los antepasados de los cetáceos actuales (parientes de ungulados terrestres como los ciervos y los antílopes) abandonaron la tierra y penetraron en el mar. Lentamente, con el paso de millones de años, fueron diversificándose y se extendieron por todos los océanos del mundo; hoy se encuentran, por el Sur, hasta en el continente Antártico y, por el Norte, hasta el borde helado del Artico. Los biólogos están empezando a comprobar que esos majestuosos navegantes de las profundidades poseen repertorios de conducta tan ricos y complejos como los de algunos animales terrestres. Estamos descubriendo en ellos animales muy sociales, similares a los ungulados herbívoros y, en algunos aspectos, a los primates y a los carnívoros terrestres.

El panorama del comportamiento de las ballenas que empieza a dibujarse es fruto del esfuerzo investigador desplegado a lo largo de la última década, y estimulado en parte por la amenaza de su extinción ante el acoso de la industria ballenera. Hasta 1970, nuestro conocimiento sobre las ballenas procedía, en buena medida, de los diarios de a bordo de los capitanes de los buques balleneros de los siglos XIX y XX. En algunos casos, esos relatos ofrecían información sorprendentemente detallada sobre los comportamientos sociales y de alimentación de las distintas especies, pero solían referirse a animales sometidos a estrés, perseguidos o arponeados por los balleneros.

A diferencia de los animales terrestres, que pueden observarse sin interrupción durante días o años y seguirse a lo largo de muchos kilómetros, las ballenas sólo suelen dejarse ver en la superficie, es decir, menos del 20 por ciento de su tiempo. Se ha dicho que el análisis etológico de los cetáceos podría compararse con el estudio de los ratones a partir de la observación de los movimientos de su cola. Pero gracias a las nuevas técnicas, la investigación ha registrado un notable progreso recientemente.

Los estudios que, durante los últimos siete años, he venido realizando sobre la ballena franca vasca en el borde de los campos de hielos polares del mar de Beaufort (en colaboración con mis colegas de los Laboratorios Marinos de Moss Landing y con W. John Richardson, de LGL Ltd., una sociedad de investigación ambiental cercana a Toronto) se apoyan en varios avances tecnológicos. Anotábamos y grabábamos en video las interacciones sociales y las estrategias alimentarias de las ballenas francas desde una avioneta bimotor, a 500 metros sobre el océano (la altura mínima posible sin perturbar a las ballenas). También registramos sus sonidos mediante hidrófonos (micrófonos subacuáticos) fijados a boyas flotantes llamadas sonoboyas. Escuchando a las ballenas desde el avión correlacionamos sus sonidos con comportamientos específicos. Fotografiando cada ballena por separado (mediante una técnica desarrollada por Roger Payne, del Fondo Mundial para la Vida Salvaje) localizamos y seguimos distintos ejemplares.

Algunos de los descubrimientos más apasionantes de la última década se refieren al comportamiento alimentario de los cetáceos de barbas, o ballenas verdaderas, que pertenecen al suborden de los Misticetos (o Mistacocetos), uno de los dos que constituyen el orden Cetáceos. El otro, el de los Odontocetos, comprende los cetáceos dentados (el cachalote, la orca, los delfines y las marsopas), todos los cuales tienen dientes y se alimentan de presas relativamente grandes, como peces y calamares.

En lugar de dientes, los misticetos poseen barbas, o ballenas: placas en forma de peines finamente festoneadas que les cuelgan de la mandíbula superior. Las ballenas se alimentan tomando grandes cantidades de agua, donde se encuentran las presas, y expulsándola a través de las barbas que, a modo de tamiz, atrapan el alimento, que luego tragan. Gracias a este método especializado de alimentación, las ballenas recolectan un gran volumen de presas, desde zooplancton de unos pocos milímetros de longitud hasta calamares y pececillos. La inmensa cantidad de presas consumidas se convierte en grasa, que aporta al cetáceo la energía precisa para su larga migración. La mayoría de las ballenas pasa unos seis meses al año comiendo a latitudes altas, donde abunda el alimento, y desciende luego hacia latitudes inferiores, donde el agua es más cálida y más apropiada para aparearse y parir.

Todos los misticetos son filtradores, pero el diseño de las barbas varía de una familia a otra, reflejo de la diversidad de comportamientos alimentarios del suborden. Los zoólogos distinguen tres familias de ballenas: Escríctidos, Balénidos y Balenoptéridos.

En la familia Escríctidos, representada por la ballena gris, su única especie, la barba es corta y festoneada toscamente. Se alimenta ocasionalmente de pequeñas presas suspendidas en la columna de agua; con mayor frecuencia recoge del fondo grandes cantidades de anfípodos, pequeños crustáceos. Después de ingerir varias bocanadas de sustrato fangoso, las ballenas suelen ascender a la superficie antes de expulsar el agua de la boca.

Abren y cierran entonces la boca repetidamente, dejando un rastro de fango característico. También dejan huellas en el fondo; en las zonas donde comen las ballenas grises se han encontrado depresiones características [véase "Ballenas y morsas, labradoras del fondo marino", por C. Hans Nelson y Kirk R. Johnson; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1987].

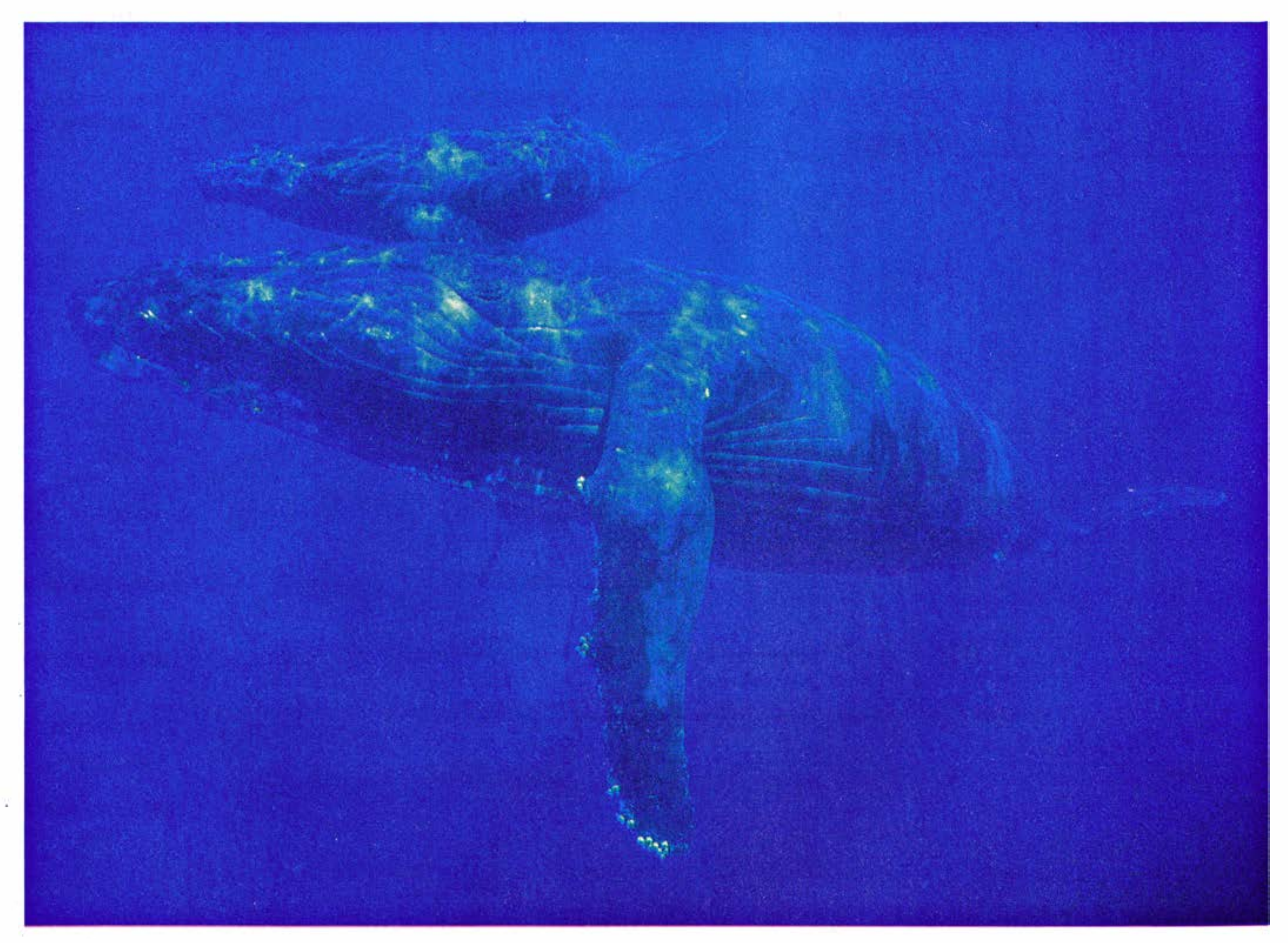
La familia Balénidos consta de cuatro especies: la ballena franca boreal, la franca austral, la ballena franca vasca y la franca enana. Todas ellas poseen barbas largas y con flecos finos, adaptadas a la captura de nubes de copépodos y de otros crustáceos nadadores. Por lo general, comen al tiempo que avanzan lentamente manteniendo la boca abierta.

Observando las ballenas francas vascas, también llamadas de bonete o negras, mis colegas y yo advertimos que modificaban bastante sus hábitos alimentarios en función de la disponibilidad de presas. Unas veces se las veía comiendo solas; otras en grupos muy sincronizados. Más aún, obtuvimos pruebas de que, ateniéndose a diversos factores, como el cambio de los vientos, salinidad, temperatura, turbidez y contenido de nutrientes, se alimentaban en la columna de agua, sobre el fondo oceánico o en la superficie.

La alimentación en la columna de agua, que es submarina, viene sugerida por el comportamiento de la ballena vasca en superficie. Bucean durante períodos prolongados (hasta 30 minutos seguidos), retornan a la superficie para respirar y se sumergen de nuevo. Cuando se encuentran en la superficie suelen defecar, un comportamiento estrechamente asociado con la alimentación. En una zona de 50 a 100 kilómetros cuadrados de superficie se ha observado a veces comer simultáneamente en la columna de agua hasta 20 o 30 ballenas.

Se cree asimismo que las ballenas vascas comen en el fondo (por lo general a profundidades de menos de 60 metros), pero no está claro de qué procedimiento se valen, equipadas como están con ballenas largas y finamente festoneadas. Hemos visto ballenas vascas subir a la superficie cayéndoles agua fangosa de los lados de la boca, comportamiento que en las ballenas grises está claramente asociado con la alimentación en el fondo. Aunque donde comen las ballenas vascas no se han encontrado señales de perturbación del sustrato comparables a los agujeros que dejan las grises, el análisis de los contenidos estomacales ha revelado la presencia de presas bentónicas (que viven en el fondo del mar).

A menudo, las ballenas vascas comen "espumando" la superficie: nadan pausadamente, sosteniendo la cabeza justo por encima del agua y la boca abierta. La mandíbula inferior cae varios grados, formando a veces un ángulo de hasta 60 grados con la superior. Es habitual también que espumen en grupos de entre dos y 14 individuos, formando escalones que recuerdan los de los gansos en formación de vuelo: cada ejemplar se alinea detrás del que



1. HEMBRA DE BALLENA JOROBADA y su cría, fotografiadas en aguas cerca de Hawai. De menos de tres meses de edad, el ballenato permanece cerca de su madre. Como todas las crías de ballenas, es precoz al nacer: nada por sí sola y sus sentidos son funcionales. (Fotografía de la Pacific Whale Foundation.)

2. LOS CETACEOS han divergido desde su origen, hace unos 55 millones de años, en los subórdenes Misticetos (Mistacocetos), cetáceos con barbas o ballenas, y Odontocetos, cetáceos con dientes. Los Misticetos comprenden 11 especies de ballenas, entre ellas el rorcual azul, el mayor animal conocido; los Odontocetos comprenden unas 80 especies de delfines, marsopas y cachalotes. A la derecha se indican, en negro macizo, los tamaños relativos de las especies.

le precede, desplazado lateralmente de medio a tres largos.

Hemos visto ballenas vascas comer en formación durante más de tres horas (la máxima autonomía de vuelo sin repostar), y creemos que persisten en ello durante varios días. A veces se modificaba la composición del grupo: algunos ejemplares se separaban, para unirse a otros, y se incorporaban ballenas distintas, pero la configuración se mantenía más o menos constante.

La alimentación en formaciones escalonadas podría permitir a las ballenas vascas explotar presas que de otro modo les resultarían inasequibles. Según un estudio de los contenidos estomacales, la porción mayoritaria de las presas del estómago de la ballena vasca está constituida por copépodos y eufausiáceos, pequeños crustáceos de natación rápida que reciben el nombre colectivo de krill. Que las ballenas vascas, de avance lento, capturen tales cantidades de esos crustáceos diminutos sugiere que la alimentación en formación escalonada brinda alguna ventaja.

La familia Balenoptéridos consta de seis especies: los rorcuales aliblanco o menor, norteño, franco o común, de Bryde y azul y la ballena jorobada o yubarta. Estos cetáceos poseen ballenas de longitud y fineza medias; cuando comen, abren del todo la boca y embisten hacia delante, expandiendo simultáneamente la garganta (que presenta surcos como los de un acordeón). En estas ballenas la alimentación es muy activa; el ímpetu con que embisten se halla relacionado con su cuerpo, liso e hidrodinámico.

Las ballenas jorobadas del Pacífico septentrional realizan un tipo característico de alimentación a embestidas: la pesca con red de burbujas. A veces, en sus arremetidas emiten una retahíla de burbujas, al tiempo que giran rápidamente por debajo y alrededor de algún cardumen de presas. Las burbujas actúan a modo de red que acorrala las presas y las ballenas recolectan la pitanza remontando la columna con la boca abierta.

Resulta fascinante observar la pesca con red de burbujas: al principio sólo se distingue un anillo de burbujas (de unos 10 a 15 metros de diámetro) que asciende desde las profundidades. A los pocos segundos, una ballena con la boca abierta rompe la superficie, acorralando varios centenares de kilos de comida. A veces, varias ballenas pescan simultáneamente con redes de burbujas, pero se desconoce si su comportamiento es cooperativo o si se trata meramente de una respuesta a un suministro abundante de alimento.

Después de alimentarse, las ballenas migran a latitudes inferiores, donde se han podido recabar abundantes datos sobre su comportamiento social. Las ballenas exhiben muchos de los comportamientos de apareamiento, madrecría y comunicación propios de sus parientes de tierra, lo cual no es motivo de sorpresa.

Roger Payne, uno de los primeros biólogos en emprender un proyecto de investigación a largo plazo sobre el comportamiento social de las ballenas, inició en 1970 un estudio de las francas en aguas del litoral argentino, en el transcurso del cual fotografió los rasgos físicos distintivos de cada una de ellas. A lo largo de 17 años, Payne y sus colegas identificaron más de 600 ejemplares; determinaron su sexo y siguieron sus interacciones sociales durante prolongados períodos de tiempo.

Mientras estudiaba su cortejo, Payne advirtió que las ballenas francas hembras parecían escoger el macho, rehusando los intentos de la mayoría de los pretendientes en favor de uno. Al sentirse perseguidas, las hembras ensayaban maniobras de huida: se alejaban nadando rápidamente, buceaban hasta fondos someros, agitaban la cola con violencia o nadaban cerca de las demás hembras, con el ánimo de distraer o detener a sus perseguidores. Si fallaban esas maniobras, se volvían panza arriba en la superficie, manteniendo la cabeza hacia abajo y los genitales y la cola en el aire. En tal posición resultaba prácticamente imposible que un macho se apareara. Sin embargo, durante sus esfuerzos de huida, la hembra podría inclinarse repetidamente hacia determinado macho; con él tendrá más probabilidades de aparearse.

A veces, una hembra se ve rodeada por varios machos agresivos. Payne ha observado cómo uno o varios sumergían a una, puesta panza arriba, y la colocaban en una postura idónea para la cópula. La práctica sexual en la que está involucrada una hembra renuente se considera cópula forzada; observada por vez primera en los ánades reales, se ha descubierto luego en muchas especies animales. Un comportamiento semejante se ha observado también en grupos formados por una a tres hembras y por hasta siete machos. Payne lo interpreta como una forma de cooperación entre machos: cooperando entre sí, incrementan la probabilidad de que al menos uno de ellos se reproduzca con éxito.

La cooperación entre machos, en la que un individuo interviene en un acto que beneficia directamente a otro sin ganancia aparente para sí mismo, se conoce como altruismo. Cuando el macho aumenta sus probabilidades de reproducción cooperando así porque el favor se le devuelve más tarde, el comportamiento se denomina altruismo recíproco. En muchas especies, el altruismo recíproco parece haber evolucionado en respuesta a situaciones en las que resulta difícil, cuando no imposible, que un macho se aparee a solas con éxito con una hembra.

No todos están de acuerdo con esta interpretación. Scott Kraus y John H. Prescott, del Acuario de Nueva Inglaterra, y Randall Reeves, de la Estación Biológica Artica de Quebec, sugieren, apoyándose en estudios del comportamiento de apareamiento de la ballena franca boreal, que los machos no cooperan en el acceso a la hembra, sino que compiten entre sí. Según su hipótesis, el forcejeo y la exhibición de fuerza física que tienen lugar entre los machos podría servir para que la hembra valore el atractivo relativo de sus pretendientes. En la mayoría de las especies animales, la competencia (en particular entre individuos que no se hallan estrechamente emparentados) es un fenómeno más habitual que la cooperación.

A esas pruebas de competencia se suma otra: en la ballena vasca, la gris y la jorobada se han descubierto grupos sexualmente activos compuestos por una o dos hembras rodeadas por hasta seis o siete machos. Los machos de las yubartas son muy agresivos: abundan los empujones y escaramuzas, y hasta sangran cuando unos escorian a otros, señal de que están compitiendo por la hembra.

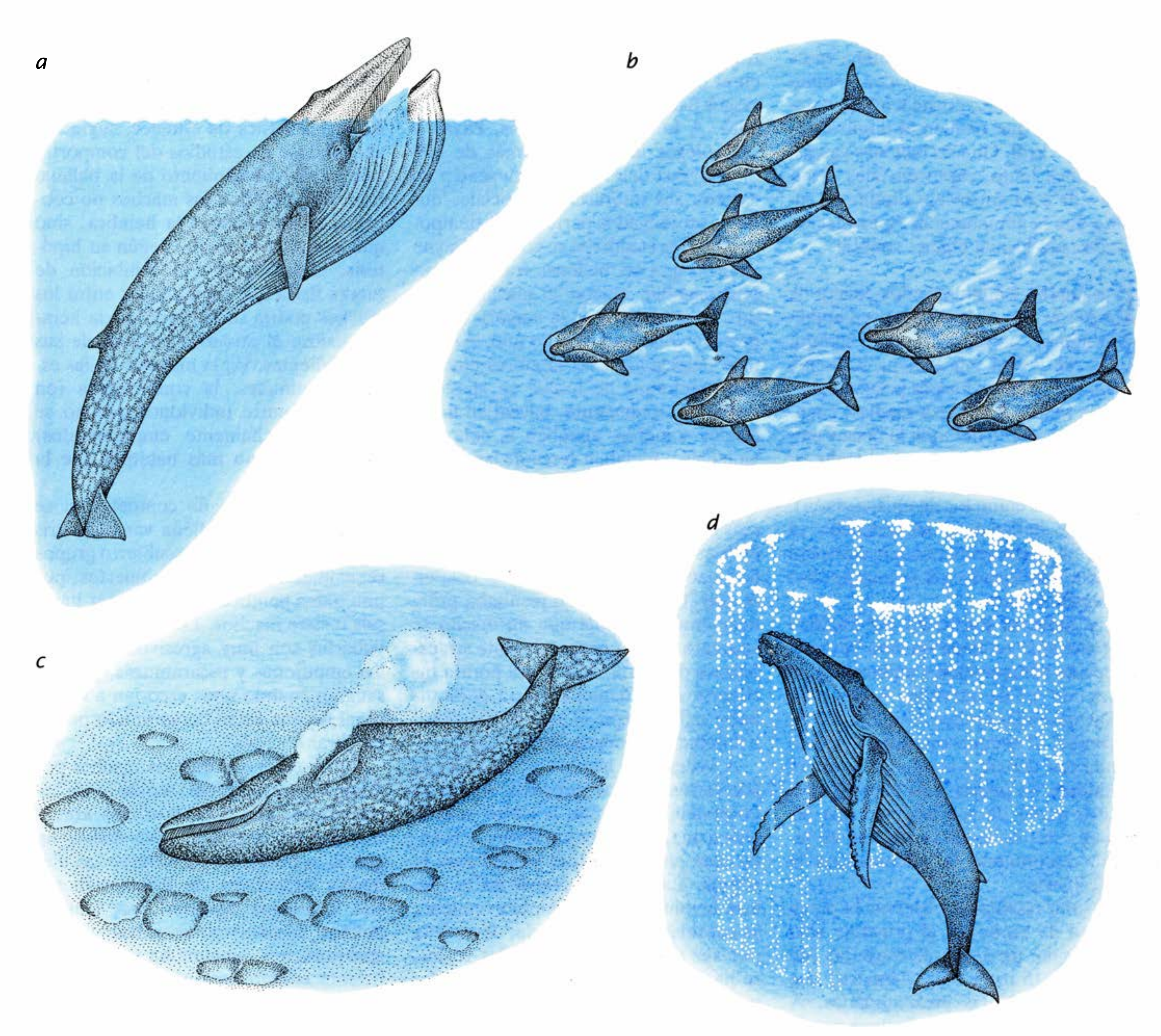
Payne reconoce que los machos podrían a veces competir; señala, para corroborarlo, que presentan más arañazos que las hembras, pero insiste en que la cooperación constituye un elemento importante de interacción social. Conviene destacar que, aunque podrían coexistir varias estrategias de apareamiento, ninguna ha recibido suficiente comprobación en las ballenas francas o demás especies; las hipótesis siguen, pues, abiertas.

Robert L. Brownell, Jr., del Servicio estadounidense de Pesca y Vida Salvaje, y Katherine S. Ralls, de la Institución Smithsoniana, creen que, en

algunas especies de ballenas, el éxito reproductor de los machos se dilucidaría en la competencia entre los espermatozoos, más que en una lucha física directa. Basan su teoría en los trabajos de G. James Kenagy y Stephen C. Trombulak, de la Universidad de Washington, quienes determinaron que, en las especies de mamíferos en las que machos y hembras son promiscuos, los testículos son mayores (respecto del peso del cuerpo) que en las especies monógamas. Al ser mayores los testículos, se producen más espermatozoos y, cuantos más libere el macho en la eyaculación, mayor será la probabilidad de que desplacen a los de los machos rivales.

Las ballenas francas y grises tienen testículos grandes en relación al resto del cuerpo, por lo que Brownell y Ralls sostienen que esas especies presentan un comportamiento de apareamiento promiscuo. Por el contrario, defienden que ballenas como el rorcual azul y la ballena vasca, que poseen testículos más pequeños, son más monógamas. En apoyo de su teoría sugieren que los machos de las ballenas francas y grises exhiben menos agresividad (señal de que no compiten por las hembras). Se sabe que los machos de las ballenas jorobadas, cuyos testículos son bastante pequeños, compiten ferozmente. Sin embargo, Brownell y Ralls no tienen todavía datos sobre las ballenas francas y grises que apoyen su afirmación.

En las yubartas se ha observado una estrategia de apareamiento distinta. Cuando no se hallan rodeadas por un cortejo de machos, las hembras suelen estar en compañía de machos solitarios. Pese a que no está claro el papel que desempeña el macho de escolta, Deborah A. Glockner-Ferrari, una investigadora por libre, cree que los escoltas incrementan su probabilidad de apareamiento manteniéndose junto a



3. ESTRATEGIAS ALIMENTARIAS, que varían considerablemente entre las especies de ballenas. Las que poseen una garganta muy expandible, parecida a un acordeón, como el gigantesco rorcual azul, comen arremetiendo (*a*): abren rápidamente la boca al tiempo que avanzan en movimiento brusco. Ingieren así grandes cantidades de agua, que filtran a través de las barbas. Las ballenas vascas a veces comen espumando en la superficie disponiéndose en una formación escalonada (*b*) que, según se cree, maximiza la eficiencia alimentaria de esa especie de natación relativamente lenta. Las ballenas grises se alimentan frecuentemente en el fondo (*c*): recolectan las presas del suelo oceánico y dejan rastros característicos en el sedimento fangoso. Las ballenas jorobadas forman a veces redes de burbujas: emiten retahílas de burbujas al tiempo que trazan círculos por debajo y alrededor de las presas, estratagema que las acorrala.

la hembra y asegurándose así el acceso a ella cuando entra en estro. Ante la aproximación de algún otro macho, el acompañante se vuelve agresivo, interponiendo su cuerpo entre el intruso y la hembra.

Que las ballenas jorobadas participen también en actividades colectivas de apareamiento en la superficie sugiere que, para ganar acceso a las hembras, los machos son capaces de adoptar múltiples estrategias. Quizá no todos los cetólogos admitan esa interpretación, pero creo que la adopción de varias estrategias de apareamiento resulta coherente con la flexibilidad conductual de ese animal. Se han documentado pautas de apareamiento alternativas en ranas arborícolas y en el grillo campestre; en estas especies, los machos silenciosos localizan a veces a las hembras antes que los machos cantores.

También se han observado entre las ballenas, igual que en los seres humanos, los chimpancés y otros mamíferos terrestres, conductas homosexuales. Se dan con frecuencia en las tres especies de odontocetos que he estudiado (los delfines oscuro, mular y volteador); [véase "Delfines", por Bernd Würsig; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1979], y también en las ballenas francas y grises. Son más comunes entre machos jóvenes, que quizá se ven privados del acceso a las hembras por su menor tamaño y su condición social inferior.

Las interacciones entre madres y crías en las ballenas francas australes resultan sorprendentemente similares a las de los mamíferos terrestres, como el reno y el caribú, que también emigran hasta puntos muy distantes. Sara Taber y Peter Thomas, de la Universidad de California en Santa Cruz, encontraron que, durante el primer mes de vida, el ballenato depende totalmente de su madre y la sigue instintivamente, mamando periódicamente. Rara vez llegan ambos a perder contacto; si se separan a una distancia de uno o más largos, la madre acorta la separación nadando hacia la cría; protege así al ballenato de los depredadores y quizá le proporciona también fuerza de sustentación hidrodinámica, evitando que se fatigue fácilmente.

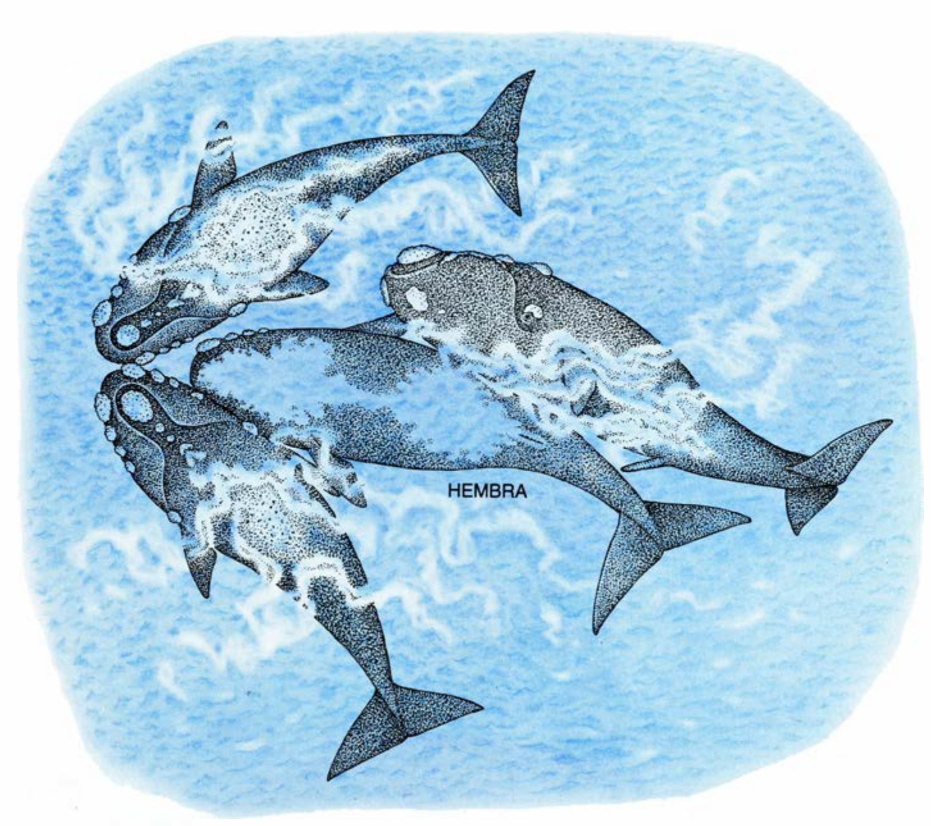
Entre el mes y los tres meses de edad, el ballenato se vuelve cada vez más activo; suele alejarse de la madre y girar en su derredor a una distancia de uno a tres largos. Taber y Thomas sugieren que esa actividad incrementa la fortaleza y la coordinación muscular del ballenato antes de que, en primavera, se realice la emigración alimenticia hacia latitudes superiores.

Una semana antes de emigrar, el nivel de actividad de las crías decae y vuelven a la custodia protectora de la madre. Taber y Thomas imaginan que la renovación del trato constituye una estrategia adaptativa que aumenta la probabilidad de supervivencia del ballenato en mar abierto, donde las orcas o espolartes son los principales depredadores de las jóvenes ballenas francas. La amenaza de otros peligros, como los tiburones o la arremetida de tormentas violentas, quizá cuente también a la hora de mantener juntos a madre y cría.

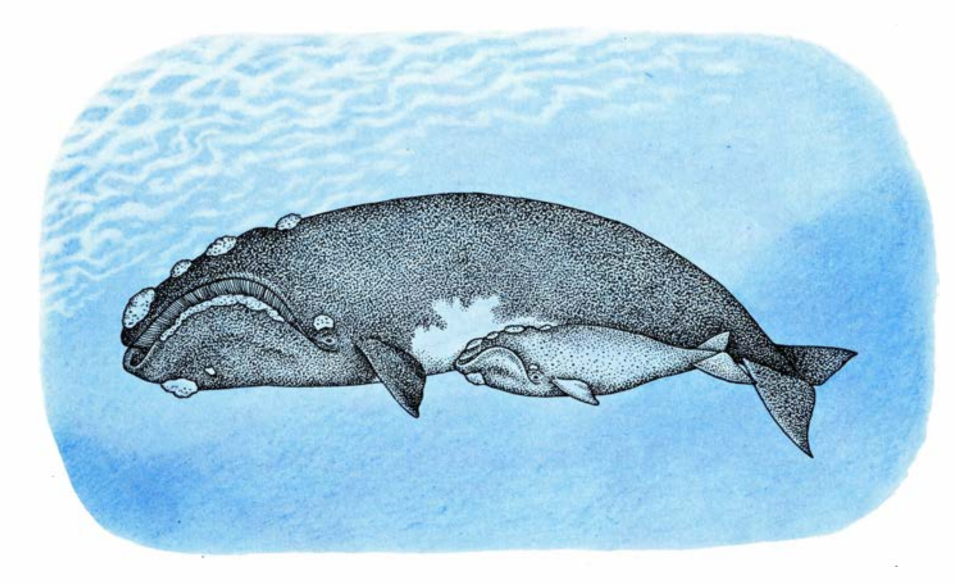
Después de pasar de cinco a siete meses comiendo en alta mar, madres y ballenatos vuelven a aguas más someras. El ballenato todavía lacta de su madre (y continuará haciéndolo hasta que tenga más de un año de edad), pero su conducta es ahora claramente más independiente y activa que antes de la migración. Por primera vez desde el nacimiento de la cría, la madre exhibe señales de independencia, separándose del ballenato con más frecuencia de la que se acerca a él, si bien éste se mantiene cerca de la madre y mama con frecuencia.

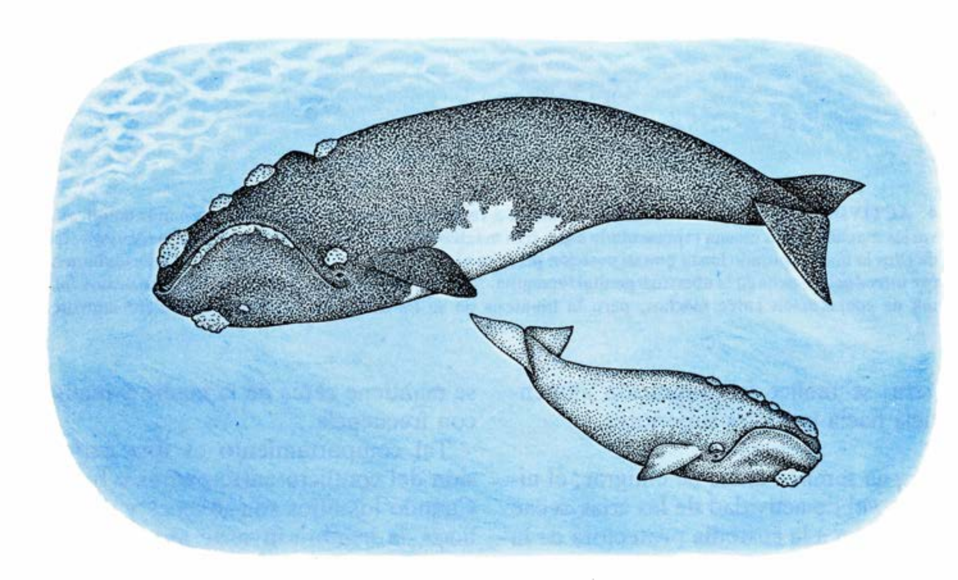
Tal comportamiento es una expresión del conflicto entre padres e hijos. Cuando los hijos son jóvenes y desvalidos, la hembra invierte mucho en su cuidado, para asegurarles la supervivencia. Sin embargo, cuando son mayores y menos vulnerables, a la madre le conviene destetarlos rápidamente, para dirigir su energía a la producción de más hijos. El conflicto entre padres e hijos se ha documentado en papiones, monos, alces y el caribú (así como en otros mamíferos), pero no se había descrito en los cetáceos antes de los estudios de Taber y Thomas.

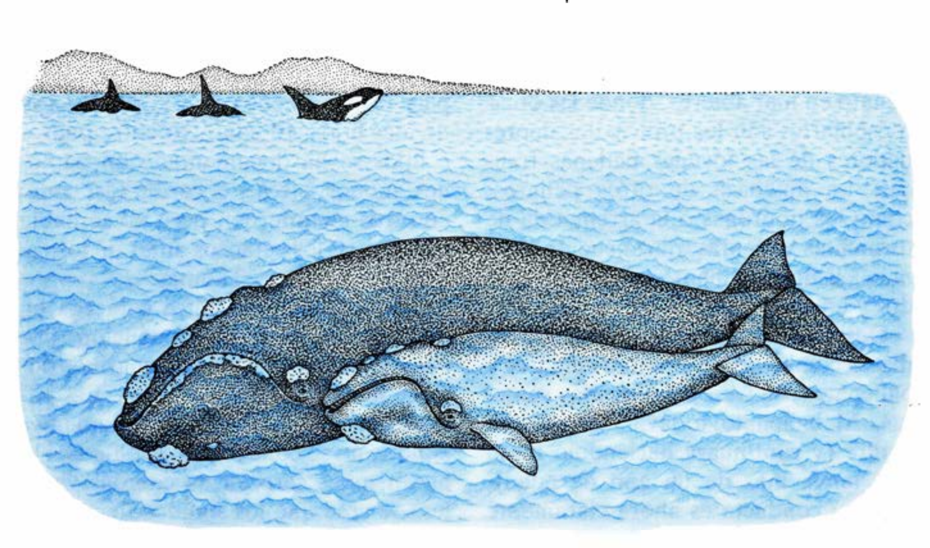
La comunicación entre cetáceos ha merecido considerable atención por parte de los mastozoólogos marinos durante los últimos 15 a 20 años. Las ballenas se comunican acústicamente, aunque no se conoce por qué medios lo hacen, pues carecen de cuerdas vocales. Se cree que los sonidos tienen importancia en la comunicación sexual y social; también permiten que los individuos reunidos en manadas laxas permanezcan en contacto mutuo y posiblemente señalen el peligro. Una situación análoga se ha descrito en los lobos: los



4. ACTIVIDAD SEXUAL en las ballenas francas; a veces tiene lugar en grupos de una o más hembras y varios machos. En la escena representada aquí, tres machos han rodeado a una única hembra (*centro*). Dos de ellos la han empujado hasta que su posición permite al tercer macho (*derecha*) colocarse adecuadamente e introducir el pene en la abertura genital femenina. Algunos investigadores creen que se trata de una forma de cooperación entre machos, pero la hipótesis no se ha demostrado todavía satisfactoriamente.







5. DURANTE EL PRIMER MES de vida, la cría de ballena franca austral permanece cerca de su madre (*arriba*) y su nivel de actividad es bajo. Cuando el ballenato tiene de uno a tres meses de edad (*centro*) es mucho más activo, a veces da vueltas alrededor de la madre y se aleja de ella unos cuantos largos. A los tres meses su nivel de actividad decrece de nuevo y el ballenato permanece junto al costado de la madre (*abajo*). El cambio de comportamiento tiene lugar una semana antes de la migración desde el área de cría, en primavera, y, según se cree, protege al ballenato de sus principales depredadores de alta mar, las orcas.

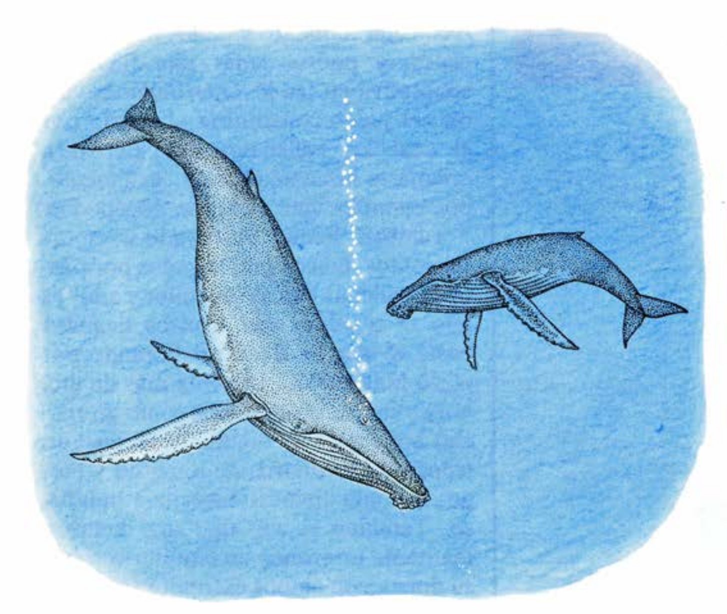
individuos suelen hallarse separados varios kilómetros durante largos períodos, pero se mantienen en contacto mediante llamadas.

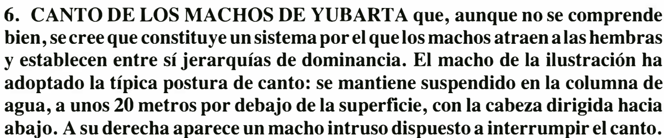
Son conocidos los melodiosos cantos de las ballenas jorobadas, descritos por Roger Payne y Scott McVay, de la Universidad de Princeton. Divididos en temas y frases reconocibles que se repiten de manera regular, sus cantos complejos pueden prolongarse durante más de media hora sin interrupción. Cuando el canto termina, la ballena suele recomenzarlo, repitiendo la misma secuencia en una pauta que puede durar varios días.

Los machos de yubarta cantan sobre todo durante la estación reproductora; al principio de la estación todos emiten el mismo canto. Katherine Payne, de la Universidad de Cornell, encontró, sin embargo, que, a medida que avanzaba la estación, el tema se modificaba gradualmente, hasta el punto de que, hacia finales del invierno, la canción que entonaban todos no se reconocía ya como la del principio. Durante la alimentación veraniega, en latitudes superiores alejadas de las zonas de cría, suelen cantar poco o nada. Cuando las ballenas jorobadas retornan al año siguiente a las áreas de cría, emiten el son con que habían concluido la estación anterior. Al final de la segunda estación, también éste ha evolucionado hasta convertirse en una canción incuestionablemente distinta.

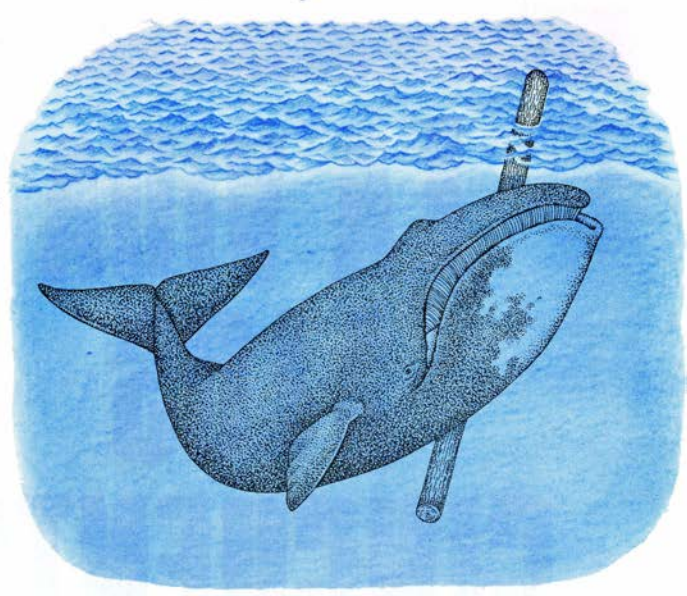
Peter Tyack, de la Institución Oceanográfica Woods Hole, y James D. Darling, de la Universidad de California en Santa Cruz, emprendieron a finales de la década de 1970 el estudio del papel que desempeña el canto en el comportamiento social de las yubartas de las islas Hawai. Encontraron que los machos cantan únicamente cuando están solos, suspendidos en la columna de agua a unos 20 metros por debajo de la superficie, con la cabeza hacia abajo. Sus cantos son tan potentes que se escuchan bajo el agua hasta a cinco kilómetros de distancia. En ocasiones, un macho cantor se aproxima a otro macho. Cuando así ocurre, ambos nadan en silencio, juntos, durante varios minutos; al separarse, uno de los dos machos vuelve a cantar. Tyack cree que, interrumpiendo el canto, el macho intruso reduce las posibilidades de que alguna hembra escoja al cantor como pareja.

Según Darling, los cantos constituyen el equivalente de la competencia entre machos en tierra, donde, por





6. CANTO DE LOS MACHOS DE YUBARTA que, aunque no se comprende bien, se cree que constituye un sistema por el que los machos atraen a las hembras y establecen entre sí jerarquías de dominancia. El macho de la ilustración ha adoptado la típica postura de canto: se mantiene suspendido en la columna de agua, a unos 20 metros por debajo de la superficie, con la cabeza dirigida hacia abajo. A su derecha aparece un macho intruso dispuesto a interrumpir el canto.



7. ACTIVIDAD DE JUEGO PROLONGADA, registrada en varias especies de ballenas. Aquí, una ballena vasca adulta, observada en aguas de Alaska, intenta sumergir un tronco con la mejilla. Se la vio levantar reiteradamente el tronco hasta unos tres metros de altura en el aire y empujarlo con una aleta u otras partes del cuerpo; le dedicó a esa actividad más de una hora. El juego resulta de gran importancia para el desarrollo de los hábitos sociales entre ballenas.

ejemplo, los machos de cabra blanca de las Montañas Rocosas utilizan los cuernos para poner a prueba la fuerza de sus contrincantes. Los cantores son machos dominantes, que exhiben su fuerza con los sones, igual que los cuernos del macho cabrío advierten del atractivo de su portador a las hembras sexualmente receptivas.

Christopher W. Clark, de Cornell, y su esposa Jane Clark empezaron a investigar los sonidos de las ballenas francas a finales de la década de la década de 1970. Al principio los sonidos parecían monótonos y repetitivos, pero con el tiempo los Clark fueron distinguiendo variaciones sutiles y complejas. Además, ayudados de hidrófonos especiales, que proporcionan información direccional, localizaron los distintos vocalizadores y asociaron determinados sonidos con comportamientos específicos.

En la actualidad se reconocen seis gritos de las ballenas francas: creciente, menguante, alto, híbrido, pulsante y constante. Las llamadas crecientes (de baja frecuencia y que ascienden de tono rápidamente en períodos de un segundo), las más comunes, sirven para reunir a las ballenas que las emiten. Las menguantes (de baja frecuencia y que la reducen rápidamente) abundan menos y actúan a modo de comunicación a larga distancia entre ballenas que están separadas de varios centenares de metros a varios kilómetros. Las llamadas altas (de frecuencia superior a las demás) aumentan de manera desproporcionada cuando crece el tamaño del grupo que las emite; reflejan niveles crecientes de excitación, que suele ir asociada con grupos de ballenas sexualmente activas. Las híbridas (de frecuencia y modulación de amplitud mixtas) y las pulsantes (ruidos broncos o gruñidos) se hallan asociadas de modo casi invariable con grupos de tres o más ballenas y aumentan a medida que lo hace la agresión física en el grupo. Hay indicios de que las llamadas pulsantes las emiten sólo uno o dos miembros de un grupo activo, los más agresivos quizás. Las llamadas constantes (de poca variación de frecuencia) son raros y no se han asociado todavía a comportamientos específicos.

Resulta interesante que estas pautas de sonido (en las que las llamadas altas indican excitación y los sonidos híbridos y pulsantes denotan agresión) sean análogas a las que emiten los animales terrestres: los sonidos de alta frecuencia no suelen ser hostiles, mientras que los pulsantes se muestran típicamente antagonísticos.

Los Clark encontraron también que las ballenas francas se comunican mediante sonidos no vocales. Según se cree, los soplidos, que las ballenas suelen provocar exhalando vigorosamente a través de los orificios nasales, en superficie o ligeramente por debajo de ella, indican irritación; los emiten, por ejemplo, ante la presencia de delfines que giran a su alrededor o frente a ellas. Los sonidos de palmadas, que realizan golpeando las aletas contra la superficie, parecen indicar que algo (verbigracia, el paso próximo de una barca a motor) llama la atención o irrita a algún individuo. El palmoteo en el interior de un grupo suele señalar agresión hacia otros miembros del grupo.

Durante nuestros estudios sobre las ballenas vascas, en el mar de Beaufort, nos sorprendió encontrar, a mis colegas y a mí, un comportamiento de juego, tanto en ejemplares jóvenes como en adultos. En ocasiones, el ballenato permanecía a solas en la superficie durante intervalos de hasta 30 minutos, mientras la madre buceaba al fondo en busca de comida. La cría se comunicaba con ella intercambiando llamadas crecientes y menguantes, que registramos con hidrófonos que sumergimos desde nuestra avioneta. Mi alumno Bernie Tershy ha registrado llamadas similares entre hembras de rorcual de Bryde y sus ballenatos.

En dos ocasiones observamos que ballenatos solitarios "jugaban" con restos flotantes, orientándose hacia ellos y nadando a su alrededor y por debajo durante quizás 30 minutos. En un caso, los restos eran pecios flotantes; en el otro se trataba de una mancha de colorante verde que habíamos lanzado para señalar la posición de las ballenas. Según se cree, en las crías de mamífero el juego resulta de gran importancia para el desarrollo de la capacidad de

recolectar alimento y de los hábitos sociales, y podría tener una finalidad adaptativa en las jóvenes ballenas vascas; el juego constituiría el medio por el cual los ballenatos aprenderían a orientarse hacia una fuente de alimento, por ejemplo, una nube de copépodos.

También hemos observado comportamientos lúdicos prolongados por parte de ballenas vascas juveniles y adultas que se topaban con troncos llegados hasta el mar de Beaufort flotando por el río MacKenzie. Durante más de una hora y media observamos cómo un macho arrojaba repetidamente al aire un tronco de 10 metros de longitud y luego, con una aleta, lo forzaba a hundirse. También se vio que una hembra mantenía un tronco en equilibrio sobre su dorso, con ambos extremos fuera del agua, lo arrojaba, rodando, al agua y repetía el número de equilibrio.

Roger Payne observó un comportamiento lúdico similar en ballenas francas adultas que se colocaban grandes frondes de laminarias flotantes sobre la cabeza y el dorso. También en los delfines se ha visto comportamiento de juego, pero los mamíferos terrestres adultos no suelen exhibirlo con frecuencia (los chimpancés y los humanos constituyen una excepción), y el valor adaptativo, si lo tiene, no está claro. Me parece plausible que las ballenas se dediquen a divertirse un rato en el océano, por lo demás bastante monótono y aburrido.

Vivimos tiempos apasionantes en lo que concierne a la investigación de los cetáceos. A medida que se perfeccionen las técnicas de investigación, es probable que el comportamiento aparezca más complejo de lo que aquí se ha descrito. Ya sabemos que no son meros pacedores del océano, sino mamíferos sociales que exhiben una variada conducta de apareamiento, con atisbos a la vez de competencia y de cooperación. En la alimentación, el apareamiento, las interacciones entre madre y cría y la comunicación, esos animales presentan pautas de comportamiento sorprendentemente similares a las de los mamíferos terrestres.

Resulta difícil el seguimiento de las ballenas bajo el agua, razón por la cual el progreso en su estudio es, a veces, desesperadamente lento; no obstante, confío en que, a medida que aumente en los años venideros el número de estudios sobre las grandes ballenas, los biólogos acaben sabiendo casi tanto de su etología como de la de algunos de sus parientes terrestres.

Los pólipos de Trembley

Los elegantes experimentos que Abraham Trembley realizó con hidras en la década de 1740 señalaron los albores de la zoología experimental. Sin embargo, pocos conocen su nombre y los detalles de sus investigaciones

Howard M. Lenhoff y Sylvia G. Lenhoff

Todo biólogo sabe que algunos animales primitivos se reproducen asexualmente por gemación; que a partir de segmentos del cuerpo algunas especies regeneran el organismo entero y que pueden injertarse tejidos de un individuo en otro de su misma especie. Sin embargo, pocos investigadores se detienen a pensar que estos hechos no siempre resultaron tan palmarios. Y son menos todavía los que saben que su descubridor fue Abraham Trembley, un oscuro preceptor suizo cuyas sorprendentes revelaciones acerca de los curiosos invertebrados llamados hidras trastornaron e intrigaron a la Europa de la Ilustración de principios de la década de 1740 y le merecieron, a los ojos de algunas autoridades, el título de "padre de la zoología experimental".

No es de extrañar que Trembley sea hoy casi un desconocido. En la bibliografía, cuando se le menciona suele explicarse poco su vida, sus métodos innovadores, la influencia de su obra en sus contemporáneos o la notable importancia de su método y sus descubrimientos para la ciencia moderna. Creemos que ha llegado el momento de que Trembley salga del anonimato.

¿Quién fue Abraham Trembley y qué le llevó a interesarse por las hidras o, como él las llamaba: "pólipos de agua dulce con brazos que parecen cuernos"? Nacido en 1710, en el seno de una prestigiosa familia ginebrina, creció en un períodò en el que muchos intelectuales de su ciudad natal dirigieron la mirada a la historia natural. Por su parte, sus intereses académicos se centraron inicialmente en las matemáticas, no en los animales, y, siendo alumno de universidad, preparó una tesis sobre cálculo.

Concluida su educación, el joven Trembley buscó trabajo en Holanda. Allí, como preceptor en la finca del conde William Bentinck, próxima a La Haya, realizó las observaciones y los experimentos que habrían de revolucionar el estudio de los seres vivos. Por asombroso que parezca, hizo multitud de descubrimientos en el breve intervalo que va de 1740 a 1744, mucho antes de la aparición de instrumentos complejos y recurriendo la mayoría de las veces a una lupa y, ocasionalmente, a un sencillo microscopio simple.

La curiosidad de Trembley por las hidras —que son celentéreos, el mismo *phylum* al que pertenecen las medusas y los corales— se despertó mientras observaba plantas y animales acuáticos recolectados en las acequias de la finca del conde. En sus ratos libres, los frascos de vidrio "habitados por diminutas criaturas" le resultaban "una buena compañía con la que descansar de ocupaciones más serias".

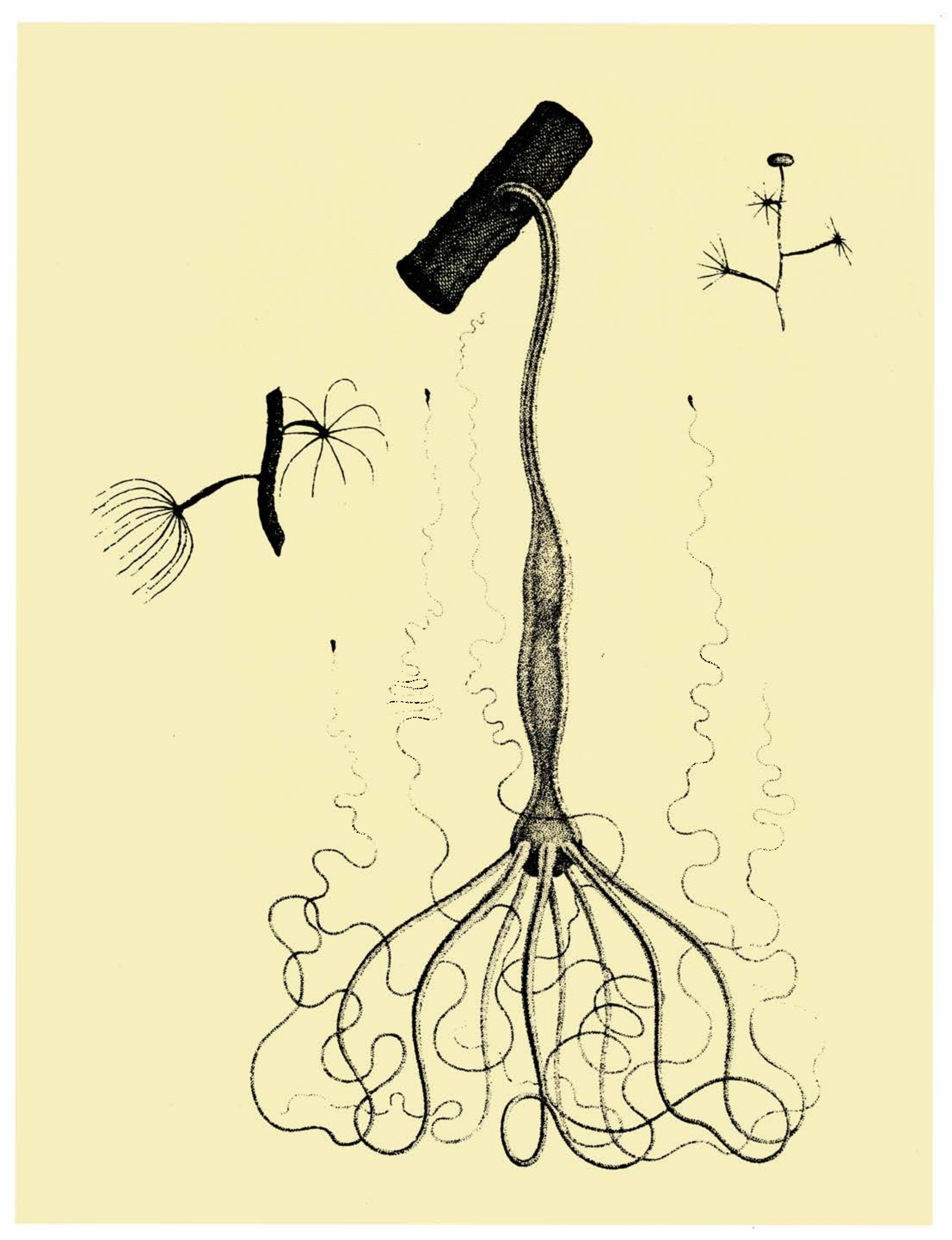
Al principio le atrajeron más los habitantes de animados movimientos que las estáticas hidras. Estos organismos, de apenas algo más de un centímetro de longitud y que parecían tubos adornados con una corona de tentáculos en un extremo, daban la impresión de ser inmóviles, lo que le llevó a suponer que se trataba de plantas elementales. Pero un día de junio de 1740, Trembley los ve contraerse y estirarse. Asombrado, permaneció al acecho de alguna otra manifestación de comportamiento animal hasta que, tras varios días de observación, vio que sus individuos daban pasos.

Convencido de que las minúsculas criaturas eran animales, Trembley dejó de prestarles atención. Al cabo de un mes, más o menos, la casualidad hizo que reparara en que tenían cierta inclinación por la luz. En una época en la que la mayoría de los naturalistas se limitaban a describir los organismos que observaban, y poco más, decidió profundizar en esa observación mediante experimentos. Procedió a demostrar, por vez primera, que animales carentes de ojos presentaban fototaxis, es decir, movimiento hacia la luz. Por ejemplo, en uno de sus experimentos, cubrió un frasco de pólipos con una funda de cartón donde había abierto un pequeño orificio. Fue luego girando la funda a intervalos y resiguió la trayectoria de la migración de los individuos, que siempre era hacia la luz que penetraba por la abertura.

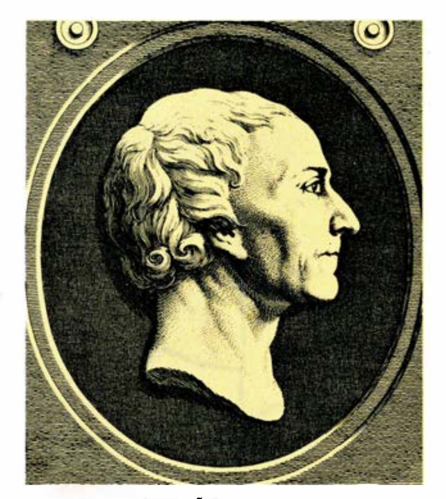
El interés del preceptor convergía ya irremediablemente en las hidras, y decidió estudiarlas más en serio y con mayor atención. Uno de sus primeros logros fue probar que, a partir de un pequeño trozo de un animal, se regeneraba el organismo entero. Empezó a estudiar el fenómeno tras observar que las hidras presentaban un número variable de tentáculos, o "brazos", característica decididamente insólita en un animal. Lo desacostumbrado del hecho le hizo pensar en bisecar un ejemplar para ver si las dos mitades se desarrollaban hasta generar organismos completos. De ser así, el hallazgo llevaría a pensar que los pólipos eran plantas. Pero Trembley halló pronto pruebas de que eran animales: vio que una especie parda atrapaba y devoraba una presa. Sin embargo, por fortuna no hizo esta observación hasta después de haber demostrado, de modo concluyente, que las hidras reconstituían las partes perdidas. Como dijo Trembley, si primero los hubiera visto comer, nunca habría decidido investigar la regeneración.

Para comenzar los estudios, dividió una hidra transversalmente y examinó las dos partes a la lupa en diversas ocasiones a lo largo del día. Transcurridos algunos, creyó advertir que la mitad posterior seccionada rehacía los tentáculos. Pronto se le disiparon las dudas: el segmento se había convertido en una hidra completa.

"Cuando examiné las dos partes a la lupa con toda la atención de que fui ca-



1. TRES ESPECIES DE HIDRAS —o pólipos, como se las llamó originalmente— revelaron a Trembley sus secretos a principios de la década de 1740. Carl Linné dio a esos animales el nombre de "hidras" en 1746. Trembley descubrió y estudió primero la variedad verde, *Hydra viridissima* (*derecha*). Luego dos pardas: *Hydra vulgaris* (*izquierda*) e *Hydra oligactis* (*centro*). El naturalista Lyonet dibujó las figuras, reproducidas aquí de dos láminas de *Mémoires*.





2. RETRATO Y VIÑETA que muestran a Abraham Trembley a los 68 años de edad (*izquierda*) y como joven preceptor (*derecha*). El retrato procede de una obra de Trembley sobre educación publicada en 1783. En la viñeta, extraída de las *Mémoires*, el autor está volviendo del revés una hidra ante sus alumnos.

paz, señaló Trembley, ambas semejaban pólipos demostrablemente íntegros, que realizaban todas las funciones de esos organismos que me son conocidas: se alargaban, se contraían y daban pasos". En investigaciones posteriores observó también que los ejemplares regenerados comían.

El descubrimiento de la regeneración animal constituía el primer gran desafío a la aceptada "ley natural" de que, para la reproducción, resultaba inexcusable el apareamiento. El hallazgo de Trembley superó quizá la espectacularidad del realizado por su pariente Charles Bonnet, quien un año antes había descubierto la partenogénesis –el desarrollo de los huevos sin fecundación– en el curso de una investigación sobre los áfidos.

Por la época en que trabajaba sobre la regeneración, Trembley observó asimismo "un pólipo que empezaba a producir otro más pequeño", de un modo "muy similar a la manera de multiplicarse de las plantas cuando emiten *brotes*". Su emoción fue a más mientras observaba cómo crecía una pequeña protuberancia en el cuerpo del pólipo y cómo desarrollaba tentáculos y se desprendía para convertirse en una pequeña réplica de su "madre". Ideó entonces experimentos que contribuyeron a poner en claro la naturaleza de la reproducción asexual mediante gemación, demostrando, por ejemplo, que las yemas no se desarrollaban a partir de huevos.

El otro extraordinario descubrimiento de Trembley, el injerto, constituyó la culminación de una sinuosa cadena de acontecimientos. Estudiando la regeneración, observó que cuantas veces cortaba una hidra, rezumaban muchos "gránulos", o granos, de la parte seccionada de la pared corporal, que él llamaba piel. Durante algún tiempo, el joven investigador exploró el papel de esos gránulos en la difusión de los nutrientes por el cuerpo. En un momento dado se preguntó si podría alimentar las hidras volviéndolas del revés, como un guante, y colocándolas en una disolución rica en nutrientes. Los gránulos de la piel interna quedarían entonces del lado externo, donde se encontraban los nutrientes.

En una hazaña verdaderamente impresionante, consiguió invertir, sin matarla, una minúscula hidra suspendida en una gota de agua que mantenía sobre la palma de la mano. Presionaba con una cerda el pie, o base, del animal, hasta que, seguido del resto de la hidra, salía por la boca (una abertura situada en el centro de la corona de tentáculos). Los animales así invertidos sobrevivían y parecían funcionar normalmente en todos los aspectos, aunque no podían incorporar nutrientes de la disolución externa.

Una complicación surgida en ese volver del revés las hidras llevó a Trembley a la observación del primer injerto. Vio en una ocasión que la extremidad de una yema inmadura, situada en ese momento dentro de la madre invertida, asomaba por un agujero abierto en la piel de la progenitora; la yema parecía completamente unida a la madre en ese nuevo punto. El hallazgo le animó a realizar una serie ordenada de experimentos que probaron, del modo más rotundo, que podían injertarse trozos de dos hidras de una misma especie y que los injertos entre hidras de distinta especie se rechazaban. En varios de esos experimentos, colocó una hidra dentro del cuerpo de otra, dejo transcurrir el tiempo necesario para que se fundieran y luego dio de comer al animal interno. Cuando los trozos de presa llegaban al externo, Trembley sabía que los cuerpos se habían unido.

Los descubrimientos que hemos descrito fueron, posiblemente, los más importantes de Trembley, pero en modo alguno fueron los únicos. Trabajaba todavía con hidras cuando inventó la primera técnica de "tinción vital": método que permite colorear los tejidos vivos para su estudio. Trembley fue, asimismo, el primero que describió el protoplasma: la substancia gelatinosa que constituye la materia fundamental de las células de todos los organismos. Suele atribuirse ese logro a Félix Dujardin, que trabajó un siglo después. Durante el análisis de los gránulos que rezumaban de una hidra cortada, Trembley observó que se mantenían unidos merced a un "material viscoso" en el que "deben de estar contenidos todos los elementos que sirven para realizar los movimientos de contracción, flexión, etcétera." No obstante, ni él ni sus contemporáneos cayeron en la cuenta de que ese material podía constituir la substancia fundamental de todos los tejidos vivos.

El astuto investigador también descubrió secretos de otros organismos acuáticos. Así, describió el proceso de gemación en el gusano *Stylaria* y en el briozoo *Lophopus* (un invertebrado colonial); escribió sobre la anatomía de *Lophopus* con una finura y una precisión de detalle asombrosas, y le cabe el mérito de haber señalado que los briozoos son animales. Pocas personas saben que Trembley observó, además, la división celular. Sin que se hubiera postulado aún la noción de célula, describió y bosquejó la multiplicación del

alga unicelular *Synedra*. Fue el primero en demostrar que los protozoos se reproducen por división. John R. Baker, de la Universidad de Oxford, que publicó una biografía muy completa de Trembley en 1952, atribuye igualmente al preceptor suizo diversos descubrimientos en otros animales, como la formación de colonias y la construcción de tubos en los rotíferos, microscópicos animales acuáticos.

Hoy, los hallazgos de Abraham Trembley se toman por hechos dados, sin embargo, los primeros informes de sus descubrimientos causaron gran revuelo en las universidades y las sociedades científicas, así como también en los salones elegantes de la época. La reacción inicial, de incredulidad, planteó además cuestiones de índole filosófica; valga el siguiente ejemplo: si los trozos de pólipo regeneran un organismo entero, ¿qué sucede con el alma del animal?

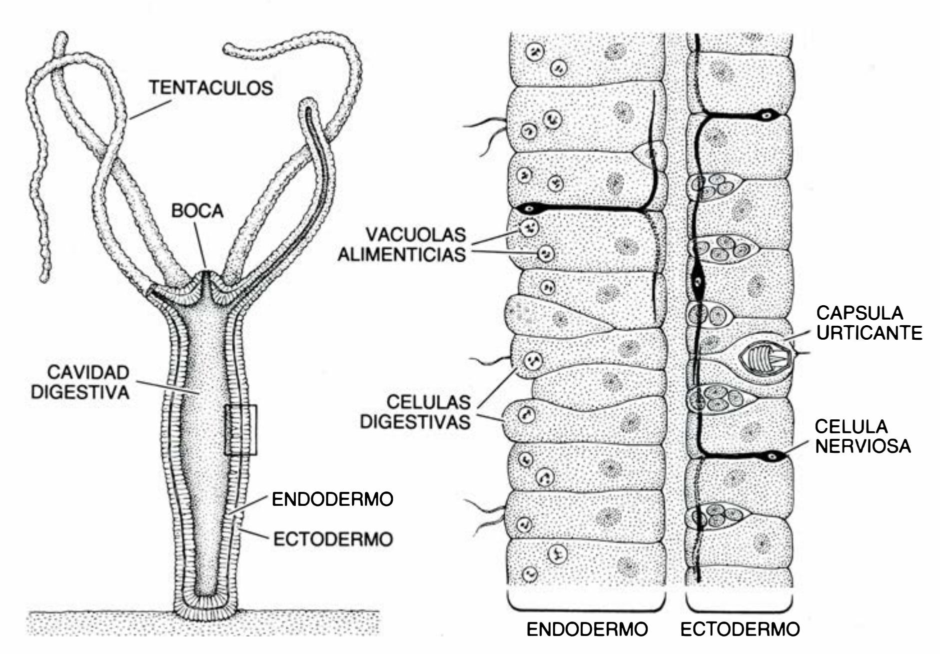
En muchos intelectuales, la negación pronto dio paso al entusiasmo por las claves de la naturaleza que Trembley había descubierto. Por ejemplo, el naturalista francés René-Antoine Ferchault de Réaumur, con quien Trembley mantuvo correspondencia durante 17 años, reaccionó con una exaltación mayúscula cuando verificó sus resultados. Fue tanto lo que se impresionó Réaumur, que animó a su joven amigo a ordenar y publicar los descubrimientos sobre las hidras —lo que Trembley llevó a cabo en 1744 con un libro bellamente ilustrado: *Mémoires, pour servir à l'histoire d'un genre de polypes d'eau douce, à bras en forme de cornes* (Memorias para contribuir a la historia natural de una clase de pólipo de agua dulce con brazos en forma de cuernos).

También fue Réaumur quien presentó los descubrimientos de Trembley en los círculos intelectuales de París, al rey de Francia y su corte y ante la Real Academia Francesa de Ciencias, que más adelante ofreció a Trembley el honor de convertirse en uno de sus académicos correspondientes. En Inglaterra, Trembley fue nombrado miembro de la Regia Sociedad Londinense en 1743 y se le concedió la prestigiosa medalla Copley, uno de los máximos galardones de la ciencia.

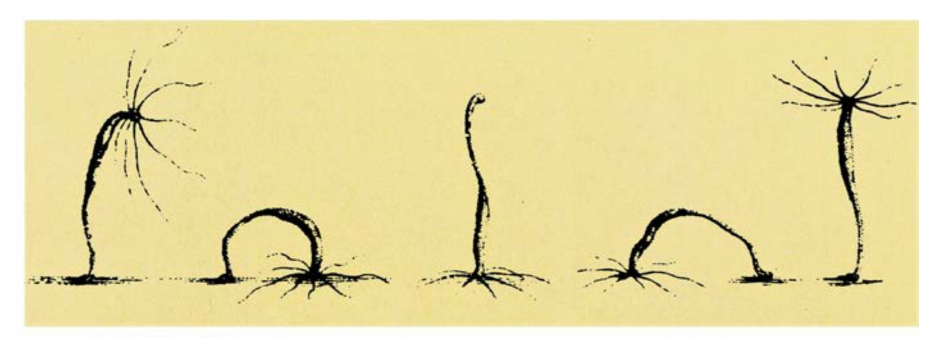
Más profundo que el aplauso popular fue su influencia directa sobre cultivadores notables de la historia natural. La obra de Trembley —junto con la de Réaumur, Bonnet y otros— validó la importancia de fundamentar la investigación de los organismos vivos en



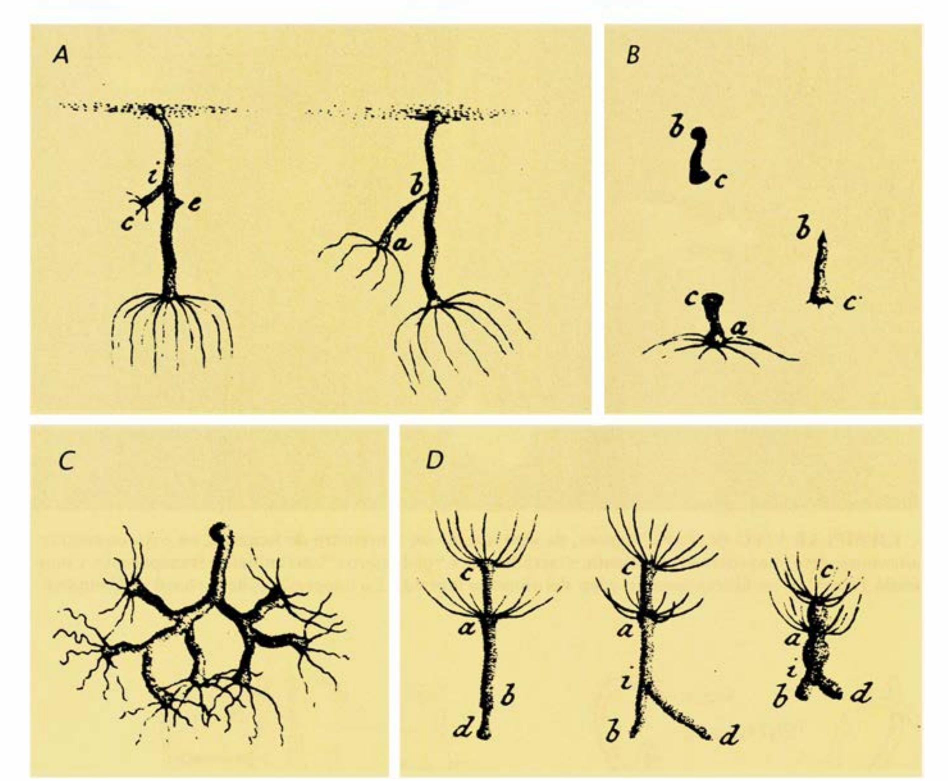
3. **EJEMPLAR VIVO** de *Hydra oligactis*, de algo más de un centímetro de longitud, en cuyo costado izquierdo aparece una yema en crecimiento. El ectodermo, o "piel externa", del animal es transparente. Como señaló Trembley, las hidras toman el color del alimento ingerido. La fotografía es de Richard D. Campbell.



4. **SECCION LONGITUDINAL** de una hidra genérica que muestra los rasgos anatómicos fundamentales. El animal se adhiere a una superficie por la base. La parte tentacular, con la boca en el centro, es la cabeza. Los progresos de la microscopía desde los tiempos de Trembley han puesto de manifiesto que las hidras presentan dos estratos de célula (*detalle*). En las células del endodermo, o estrato interno, se encuentran las vacuolas alimenticias, a las que Trembley se refería como gránulos. Los investigadores identificaron las cápsulas urticantes (nematocistos) del ectodermo casi un siglo después de los trabajos de Trembley.



5. VUELTA DE CAMPANA utilizada por la hidra como sistema de desplazamiento. Ver a los pólipos "caminando" de esa y de otras formas contribuyó a convencer a Trembley de que estas criaturas, a las que también vio contraerse y estirarse, eran animales. Cuando observó que una hidra capturaba y devoraba una presa, no le cupo ya ningunba duda de ello. Este grabado y los de la figura 6 los dibujó Lyonet.



6. VARIOS PROCESOS FUNDAMENTALES cuya investigación todavía prosigue en la actualidad los descubrió Trembley en la hidra. Reveló que los pólipos podían reproducirse asexualmente por un proceso de gemación (*A*). Cuando aflora una protuberancia, como la del punto *e* (*izquierda*), se convierte inevitablemente en una yema (*i-c*) y luego en un animal completo (*derecha, a-b*) que no tarda en independizarse de su progenitor. Demostró, además, que puede regenerarse un pólipo completo a partir de un pequeño fragmento (*B*). Cuando cortó un ejemplar en dos (*izquierda*), la porción que no tenía cabeza empezó a regenerar una nueva, con tentáculos, al cabo de un día (*derecha*). Trembley se valió también del fenómeno de la regeneración para construir un "monstruo" de siete cabezas (*C*). Para ello, escindía la cabeza de un pólipo y luego dividía reiteradamente las cabezas que se regeneraban. Llamó Hidra al animal resultante, como evocación de la figura mitológica, y fue así el primero en dar este nombre a los pólipos, aunque no lo aplicaba a los ejemplares de estructura normal. Trembley demostró asimismo que pueden injertarse dos animales de la misma especie (*D*). En el primer experimento de este tipo cortó el pie de una hidra (*izquierda*), dejando *a-b*, y dispuso el pólipo cortado sobre un ejemplar intacto (*c-d*). A la larga, el pie de *c-d* atravesó el pólipo exterior (*centro*) y pareció soldarse con él en el punto *i*, a la vez que la boca *a* de la hidra exterior parecía haberse soldado con el animal interno. En efecto, dando de comer por la boda *c*, Trembley demostró que los animales se habían unido y que poseían un único intestino ramificado, *b-i-d*. El alimento ingerido hinchó el cuerpo entero (*derecha*); si los animales no se hubieran fundido, el tramo *i-b* del pólipo exterior no se habría engrosado.

la observación directa, minuciosa, y no en ideas preconcebidas y teorías. Trembley creía que sólo merced a la observación y el experimento había revelado fenómenos, como el de la regeneración, que debían haberse descubierto mucho antes. "La naturaleza ha de explicarse con la naturaleza, insistía, y no mediante nuestras propias opiniones".

Los éxitos de Trembley animaron a muchos estudiosos de la historia natural a dar el gran salto que va de la observación de las diminutas criaturas de Dios a su investigación activa. En particular, su obra estimuló a otros científicos a plantear investigaciones que impulsaron de modo significativo el avance del conocimiento, tanto de los invertebrados marinos y dulceacuícolas como de importantes fenómenos biológicos. En ese sentido, sus experimentos despertaron el interés de los naturalistas por la regeneración. Fruto de esas investigaciones, 25 años después de que Trembley cortara un pólipo en dos, el fenómeno de la regeneración se aceptaba como un proceso natural básico. Algunos historiadores creen que la dilatada influencia del trabajo de Trembley sobre las hidras estimuló el desarrollo, en 1752, de un precursor del actual microscopio de disección.

Los descubrimientos de Trembley forman hoy parte del saber fundamental de todo biólogo. ¿Por qué, entonces, recibe tan escaso reconocimiento? Quizá porque no presentó ninguna teoría a la que pueda vincularse su nombre. Alergia a la teoría que dificulta su adscripción a una escuela filosófica o histórica concreta.

Hay también otras razones. Su talla científica se fue oscureciendo con los años. Realizó pocas contribuciones sistemáticas a la ciencia desde que dejó al conde Bentinck, en 1747, hasta su muerte, ocurrida en Ginebra en 1784. Tras abandonar Holanda, realizó una misión diplomática secreta para el gobierno británico, viajó, enseñó, escribió varios libros (sobre educación, política, religión y filosofía moral) y, en sus últimos años, dedicó sus esfuerzos a educar sus cinco hijos. Se había casado a los 46 años.

Aunque Trembley hubiera continuado dedicándose a la investigación de los vertebrados, su estrella posiblemente habría declinado durante la segunda mitad del siglo, porque la élite intelectual europea se interesaba entonces por otros temas: la electricidad y la irritabilidad de los organismos, por citar un ejemplo. A finales del siglo XIX y comienzos del XX, la investigación y el marco teórico de la biología estaban dominados por la embriología, la evolución y la genética. El enfoque antropocéntrico de los vertebrados atenuó aún más el entusiasmo por los invertebrados de Trembley. Por último, a medida que el protagonismo en la investigación biológica se iba trasladando al otro lado del Atlántico, a una sociedad mayoritariamente monolingüe, el que su obra capital sobre la hidra no se tradujera del francés al inglés —no lo ha sido hasta fecha reciente— limitó el contacto de los biólogos con el otrora renombrado investigador.

Quizá haya desaparecido Trembley de la mente de los científicos. Basta, sin embargo, una relectura de sus *Mémoires* para advertir cuánto puede enseñarles todavía. Quienes se adentren en su obra se harán una idea cabal de la biología entera de la hidra: su estructura, comportamiento, fisiología, desarrollo e interacción con depredadores y presas. Además, muchos de los fenómenos descritos en el libro invitan a un estudio más profundo por parte de los biólogos del desarrollo.

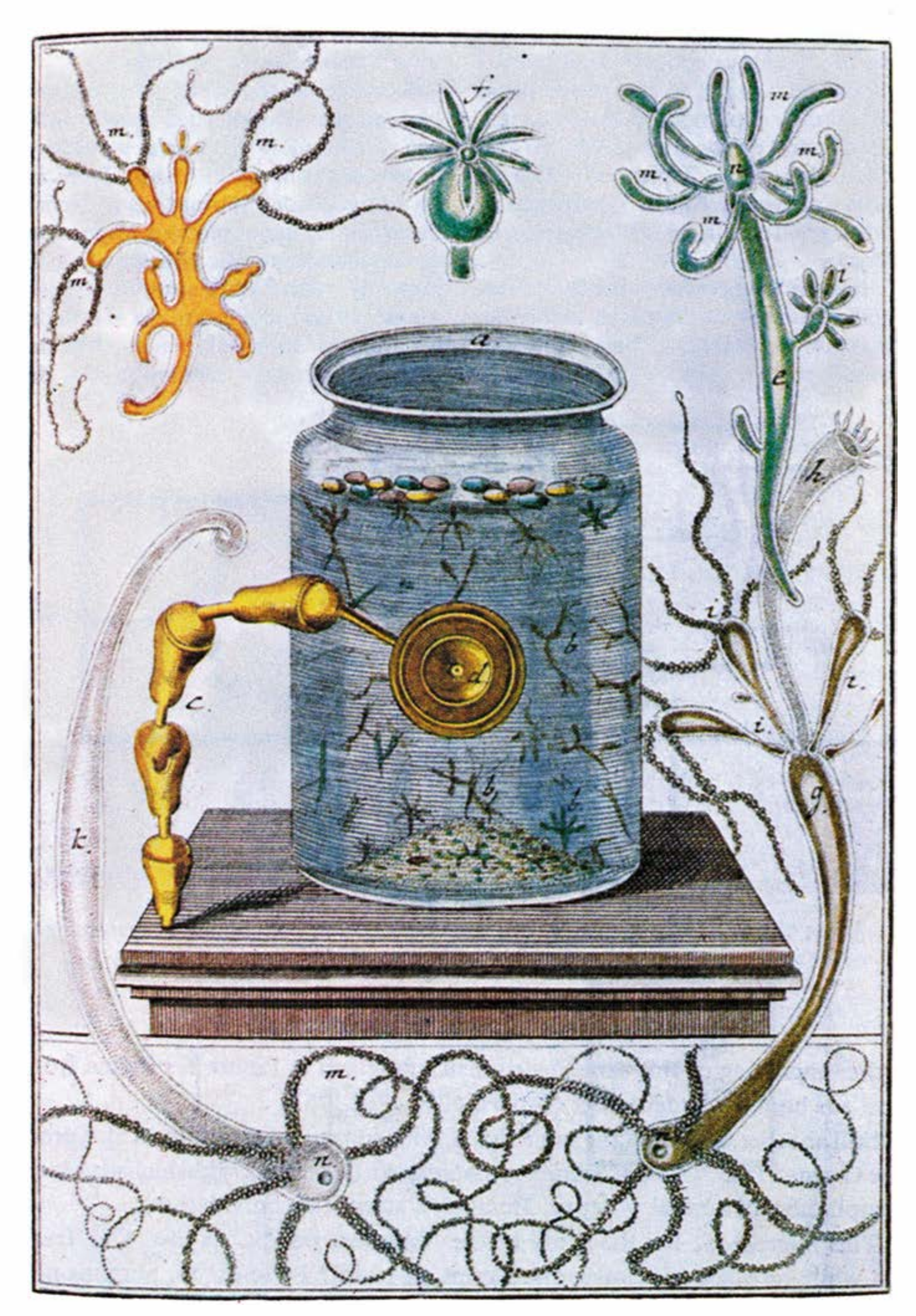
¿Qué cualidades del Trembley científico podría emular el biólogo en ciernes? Su empirismo, para empezar; insistía en posponer la formulación teórica hasta contar con datos suficientes; era un observador agudo, presto a percatarse de lo insólito y consignar sus hallazgos con precisión y detalle. Era un experimentador que no cejaba hasta verificar sus resultados por varios caminos.

Seguía un método cuantitativo, respaldando muchos de sus experimentos con cifras y repitiéndolos hasta convencerse de su validez. Interesado por todas las facetas del animal, más que por problemas aislados, no le confería a los experimentos valor duradero a menos que fueran acompañados de una descripción protocolaria que permitiera a otros su repetición. No basta con decir, escribía, "que se ha observado tal o cual cosa. Eso y nada es lo mismo, si a un tiempo el observador no explica cómo lo ha visto y no pone a sus lectores en condiciones de evaluar la manera en que se observaron los hechos consignados".

Trembley era también depositario de otras cualidades notables. Trabajaba en su despacho y en el campo, donde descubrió un buen número de especies nuevas e investigó tanto la estructura de los organismos como los mecanismos subyacentes a las funciones que observaba. Era un técnico por excelencia, que llevaba a cabo operaciones complejas y delicadas sin apenas más instrumental que una tijeras y una sonda de pelo de cerdo. Además, era tenaz. "No debe desanimarnos la falta de éxito", escribía en sus *Mémoires*, "sino que hay que intentarlo de nuevo cuantas veces se haya fracasado. Yo diría más, conviene repetir varias veces los experimentos que tienen éxito. No todo lo observable se ve, y a menudo no es posible verlo, a la primera".

Sospechamos que la admirable objetividad científica de Trembley provenía, en parte, de su fe religiosa. Creía que todas las maravillas tenían cabida en el espléndido universo de Dios. En consecuencia, nunca desmayaba ante los hechos desconcertantes que no parecían convenir con el saber aceptado. El 11 de diciembre de 1742 escribió a Bonnet: "Su gusano de dos colas es admirable, pero no me sorprende, porque nada me sorprende".

¿Qué pensaría Abraham Trembley de la biología contemporánea si viviera hoy? Creemos que este biólogo que contemplaba el organismo como una unidad, y que "se dejó llevar, por así decirlo, de una observación a otra" para descubrir la regeneración de un animal completo, la gemación y el injerto, se mostraría ambivalente. Quizá se asombrara ante los logros de la neurobiología y la biología molecular, donde se ha estrujado a los organismos para dar respuesta a cuestiones fundamentales específicas. Pero sin duda le preocuparía comprobar que los biólogos estudian, individualmente, cada vez menos fenómenos. La naturaleza es demasiado vasta, insistía él, para descuidar las investigaciones amplias y detalladas sobre la multitud de organismos que pueblan el planeta. Diría quizá: ¡qué hable el organismo!



7. MICROSCOPIO DE TREMBLEY, que no era más que una sencilla lente montada en un brazo pluriarticulado. El dibujo, realizado hacia 1762 por Martin F. Ledermüller, muestra también el recipiente donde Trembley prefería criar las hidras, rodeado (*a partir del ángulo superior izquierdo y en el sentido horario*) por una hidra fantástica, una hidra verde contraída y relajada, y ejemplares de lo que puede ser *Hydra oligactis*.

Juegos de ordenador

Hallazgo de un paleo-ordenador, hecho de cuerdas y poleas, en la jungla de Apraful

A. K. Dewdney

En la isla de Apraful, a pocos kilómetros de la costa noroeste de Nueva Guinea, los arqueólogos han descubierto los restos putrefactos de un ingenioso aparejo de cuerdas y poleas que, según se cree, debe haber constituido el primer ordenador digital. El director de los trabajos de excavación, Robert L. Ripley, del Charles Fort College, de Nueva York, fecha su fabricación hacia el 850 después de Cristo.

Fueron los aprafulios marinos excelentes. Sus naves, amén de maravillosamente construidas, iban equipadas con los más elaborados aparejos que se pueda imaginar. ¿Les abrió su maestría con las cuerdas el camino al ordenador digital? ¿Ocurrió acaso a la inversa? Ese punto sigue siendo objeto de acalorado debate entre especialistas.

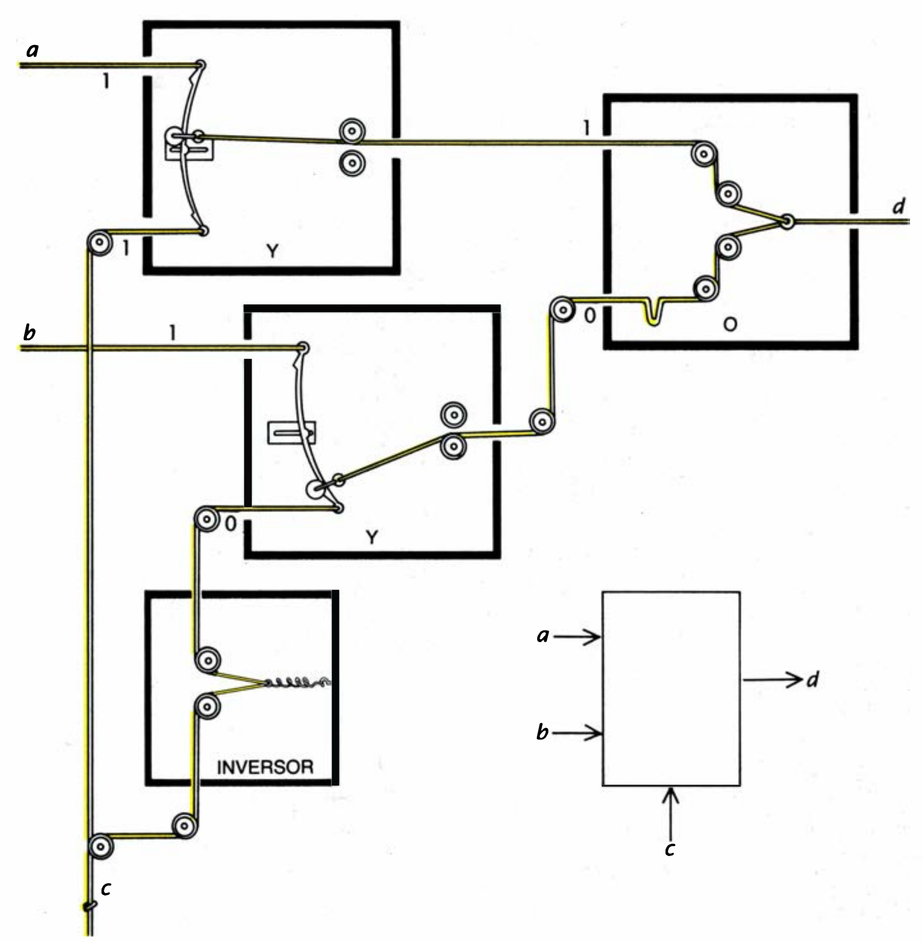
Recientemente, Ripley y su equipo han reconstruido en parte aquella antigua computadora de cuerdas y poleas y la han instalado en el Museo Tropical de Antigüedades Marinas, en la vecina Sumatra. En una minuciosa inspección de un yacimiento que se extiende a lo largo de varios kilómetros de espesa jungla, en una región situada al este de los Montes Tomapelo, la expedición descubrió vestigios semienterrados de fibras de yute. Observaron y anotaron cuidadosamente la posición de una serie de poleas de bronce, muy corroídas, y de diversos artefactos asociados a ellas. Su reconstrucción me brinda una oportunidad ideal para presentar a los lectores los principios de la computación digital sin recurrir a diminutos y misteriosos componentes electrónicos. He aquí puertas lógicas, básculas biestables y circuitos enteramente constituidos por cuerdas y poleas. Todo visible y de fácil comprensión.

Lo mismo que nosotros, los aprafulios se valían de un sistema binario, pero en vez de representar los números 1 y 0 por potenciales eléctricos, lo hacían mediante posiciones de cuerdas. Imaginemos una caja negra, perforada por un costado. El lector mantiene tensa una cuerda que sale de ese orificio. En esa posición, la soga representa el dígito 0. Si ahora el lector tira de ella, se oirán chasquidos y crujidos dentro de la caja y del agujero saldrán dos palmos más de cuerda. Esta nueva posición de la cuerda representa el dígito 1.

Podemos valernos de tales cajas para representar números. Tres de ellas, por ejemplo, permiten representar cualquier cifra de 0 a 7 [*véase la figura 2*]. Con más cajas pueden representarse números mayores. Bastan 10 para representar los que van de 0 a 1023.

Si he tomado el ejemplo de la caja negra no ha sido por azar. Según parece, a los habitantes de Apraful les encantaba encerrar sus mecanismos en cajas negras de madera, lo mismo grandes que pequeñas. Tal vez la construcción de ordenadores fuera prerrogativa de una clerecía tecnológica especial. Quizá la visión de grandes montajes compuestos por cajas negras mantenía las masas temblorosas en reverente temor.

Uno de los dispositivos clave utilizados por los aprafulios convertía los unos en ceros y viceversa. (De vez en cuando resulta conveniente hablar de 0 y 1 en vez de "dentro" y "fuera"). Este



1. Multiplexor aprafuliense. La cuerda c *determina si las señales que lleguen a* d *serán las procedentes de* a *o de* b

aparato, similar al que los modernos ingenieros informáticos denominan inversor, consistía en una caja en la que se habían perforado sendos orificios por sus caras anterior y posterior [*véase la figura 3*]. Cuando alguien (o algo) tiraba de la soga de entrada de la cara anterior de la caja, por la posterior se cedía una longitud igual de cuerda de salida. Al mirar el interior de la caja descubrimos la razón: las cuerdas que penetran en la caja por delante y por detrás pasan por sendas poleas fijas y van hacia un costado de la caja, donde ambas se encuentran ancladas a un mismo muelle.

Como algunos lectores habrán razonado ya, los dígitos 0 y 1 no estaban codificados tanto por "dentro" y "fuera" como por el sentido en el que se movía la soga. Para mejor ilustrar este punto, tomemos una caja que no contenga mecanismo alguno. Por un agujero perforado en la cara anterior pasa una cuerda que atraviesa la caja y sale por otro agujero de la cara posterior. Si tiramos de ella, haciéndola pasar de la posición 0 a la posición 1 en el frente de la caja, pasará de "dentro" a "fuera". El sentido del movimiento es hacia quien tira. Simultáneamente, en la cara posterior, la cuerda se mueve de "fuera" a "dentro", pero como el sentido del movimiento sigue siendo hacia quien tira, la cuerda avanza también en la cara posterior de 0 a 1.

Dos dispositivos más completan casi el repertorio de componentes de cómputo de los antiguos aprafulios. En el primero de aquellos mecanismos, la caja tenía dos sogas de entrada de señal. Cuando al menos una de ellas se encontraba en la posición 1, la única cuerda correspondiente a la señal de salida se encontraba también en posición 1. Los medios de que se valieron los aprafulios para lograr tal prodigio son de sencillez ridícula [*véase la figura 4*]. Dos poleas guiaban en paralelo las dos cuerdas que entraban por la parte delantera de la caja que, en su recorrido hacia la parte trasera de la caja, atravesaban una anilla, a la cual estaba sujeta la cuerda de salida. Al jalar de una o ambas sogas, se tiraba directamente de la anilla. Dado que la señal de salida sería 1 en cuanto una u otra de las entradas correspondiera a un 1, los ingenieros actuales la denominarían puerta O.

Los antiguos aprafulios construyeron lo que hoy llamaríamos una puerta Y mediante tres poleas y una varilla curva, la rodadera [*véase la figura 4*]. Una de las poleas rodaba libremente sobre la rodadera; su eje conectaba directamente con la cuerda que había de proporcionar la señal de salida. Las otras dos poleas, emparejadas y muy próximas, servían sobre todo para situar y guiar la cuerda de salida a través del orificio correspondiente. Encontrándose las dos cuerdas de entrada en la posición 0, la rodadera coincidía con el arco de una circunferencia cuyo centro estaba en el par de poleas de salida. Tirando de una de las cuerdas de entrada hasta llevarla a la posición 1, uno de los extremos de la rodadera se alejaba del círculo de reposo. La polea unida a la cuerda de salida caía entonces "cuesta abajo", hacia el extremo de la rodadera de cuya cuerda no se tiró; la posición de la cuerda de salida coincidiría aproximadamente con la que tenía al principio, pues el extremo de la rodadera seguiría encontrándose en el círculo de reposo. (Una espiga dispuesta en el centro de la rodadera evitaba que ésta se desviara a uno u otro lado de la caja al tirar solamente de una de las cuerdas de entrada.)

La soga de salida sólo avanzaría hasta la posición 1 cuando se tirase a la vez de las dos de entrada. Entonces, se arrastraría la rodadera entera hacia atrás, hasta una nueva posición: cualquiera que fuera el extremo donde acabara la polea móvil, su distancia a las poleas de salida sería la misma. El nombre de puerta Y deriva de que la salida de este dispositivo es 1, si y sólo si ambas cuerdas de entrada se encuentran en posición 1.

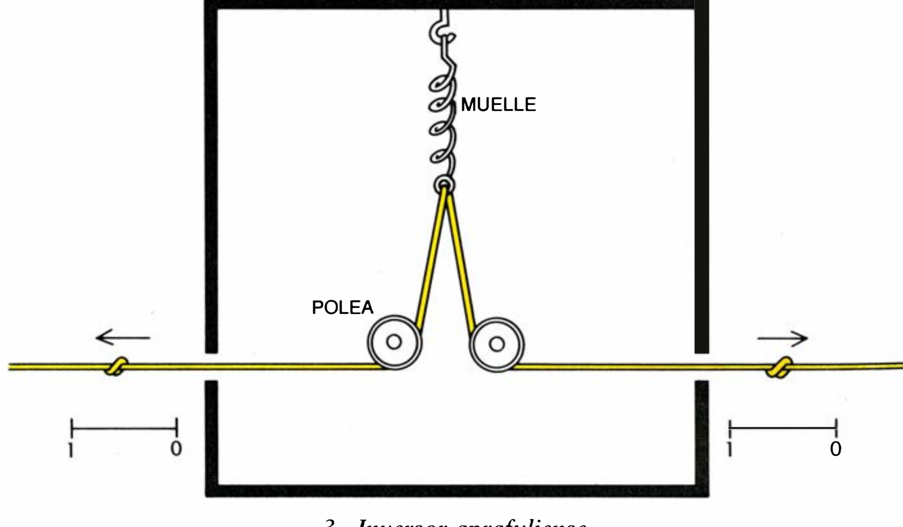
Con estos componentes puede construirse la totalidad de los circuitos de control de un ordenador digital. Entre ellos se cuentan los circuitos de cómputo de funciones aritméticas, los de

CAJA 1	CAJA 2	CAJA 3	NUMERO
DENTRO	DENTRO	DENTRO	0
DENTRO	DENTRO	FUERA	1
DENTRO	FUERA	DENTRO	2
DENTRO	FUERA	FUERA	3
FUERA	DENTRO	DENTRO	4
FUERA	DENTRO	FUERA	5
FUERA	FUERA	DENTRO	6
FUERA	FUERA	FUERA	7

2. Así representaban los números los aprafulios

interpretación de los códigos de programas y los de gobierno del flujo de información entre las diversas partes que integran el ordenador.

¿Obedecía a tal esquema el ordenador que construyeron los aprafulios? Las pruebas son demasiado fragmentarias para pronunciarse con rotundidad, pero los arqueocomputólogos que colaboran con Ripley dicen haber descubierto un sencillo multiplexador en el complejo semienterrado. En los ordenadores electrónicos, el multiplexador consiste fundamentalmente en un conmutador eléctrico que controla el paso de varias señales por un mismo hilo. Por ejemplo, el multiplexador más simple tendría dos líneas de entrada, que rotularemos *a* y *b*. En un momento dado, cada hilo puede portar una señal, 1 o 0. ¿A cuál de las señales, *a* o *b*, le será permitido atravesar el dispositivo y proseguir por la única línea de salida, *d*? La respuesta viene determinada por una cuarta línea, la de control, *c*. Si ésta porta la señal 1, se transmitirá por la línea de salida la señal que llega por *a*. Si la línea de control porta la señal

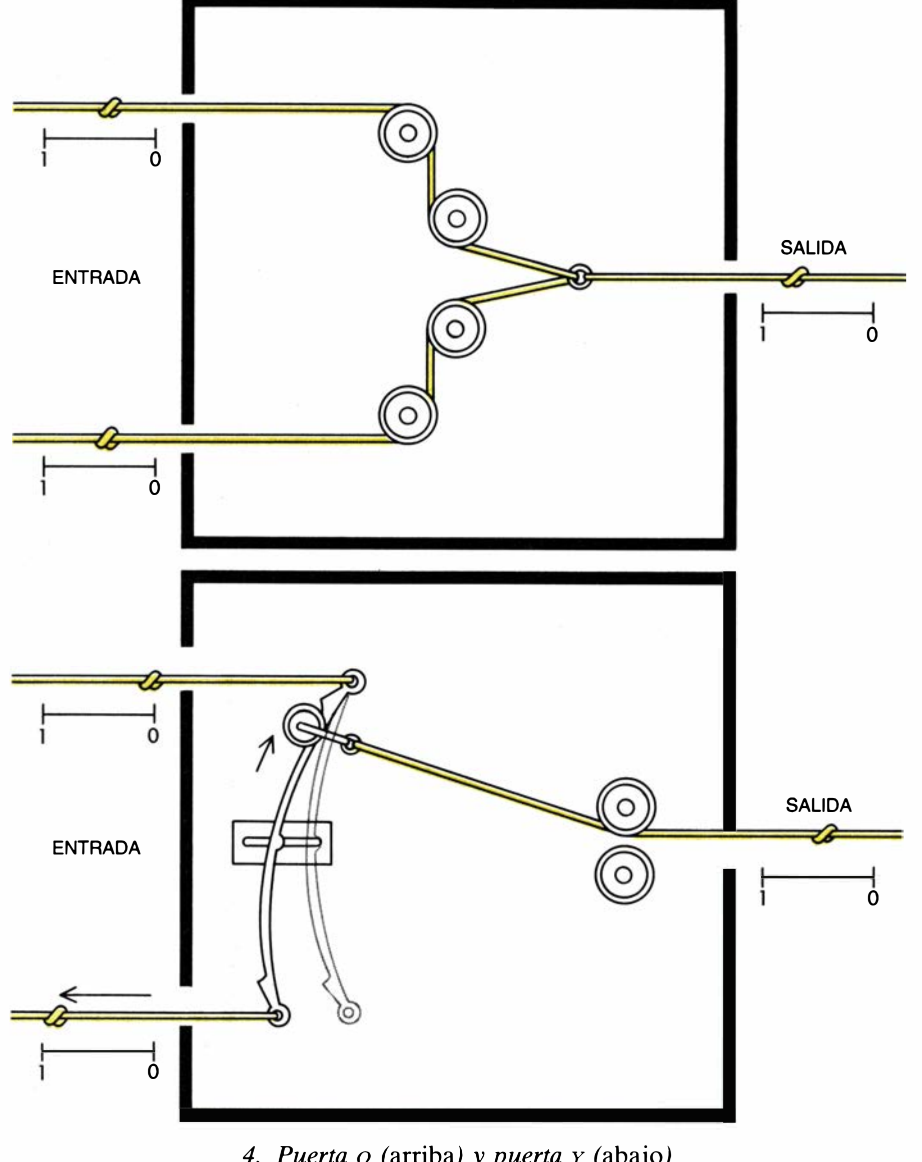


3. Inversor aprafuliense

0, pasará la señal de la línea *b* [*véase la figura 1*].

La reconstrucción del multiplexador aprafuliense de dos entradas consta de dos puertas Y, una puerta O y un inversor. Tan sencillo es el montaje que me atrevo a pensar que los aficionados a la computación recreativa podrían construirse uno en casa. En las ferreterías se advertiría un desconcertante aumento de las ventas de cuerdas y poleas. Sea como fuere, se sigue el funcionamiento del multiplexador observando la figura. Las cuerdas *a* y *b* entran en el multiplexador por la parte superior izquierda, dirigiéndose cada una a su puerta Y. La cuerda *c* se bifurca. Una de sus ramas va a la otra entrada de la puerta Y donde entra la cuerda *a*. El otro ramal de la cuerda *c* pasa por un inversor y luego entra en la puerta Y donde penetra *b*. Al tirar de *c* hasta que alcanza la posición 1, y manteniéndola así, cualquier secuencia de ceros y unos que lleguen por *a* se transmitirá fielmente hacia la puerta O a través de la puerta Y situada en lo alto. Al mismo tiempo, toda señal que llegue por *b* quedará bloqueada en la puerta Y situada bajo la primera. Si la cuerda *c* vuelve a la posición 0 inicial, el inversor crea una señal 1 en la más inferior de las puerta Y. En tal caso, cualquier señal que ingrese por *b* atravesará la puerta Y inferior, ignorándose, en cambio, las señales que procedan de *a*.

Por así decirlo, el papel de la puerta O se reduce meramente a sumar o reunir las dos señales de salida. Si se está transmitiendo la señal de la cuerda *a*, se visualiza sin dificultad en el diagrama qué ocurre exactamente: al aflojar la tensión de *a* y dejar que vuelva a 0, la polea de la caja Y rueda hasta uno de los extremos de la rodadera. Sale entonces de la caja Y una señal 0 hacia la caja O. La otra cuerda de entrada a esa caja se encuentra ya en la posición 0 (sin tensión). La tensión natural de la cuerda de salida *d* la lleva de inmediato a su nueva posición, a saber, 0. Al tirar nuevamente de la cuerda *a*, la tensión se transmite a lo largo de la senda descrita hasta llegar a *d*, provocando la retracción de la cuerda *d*.

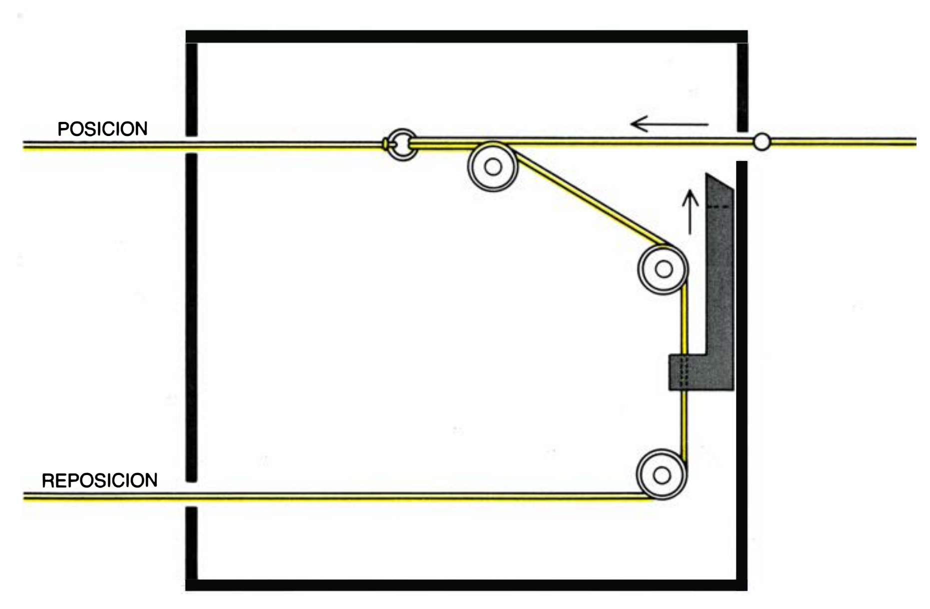


4. *Puerta* O *(*arriba*) y puerta* Y *(*abajo*)*

La posibilidad de que se aflojen las cuerdas me obliga a abordar el tema del mantenimiento de la tensión en el ordenador aprafuliense. A veces, como en la puerta O del ejemplo, una cuerda queda floja. Como es natural, se corre el riesgo de que se salga de las poleas. Ripley me cuenta que, para evitar casos así, los aprafulios se valían de un inversor especial modificado, provisto de un muelle sumamente débil. En todos los puntos donde una cuerda pudiera acusar flojedad, se instalaba uno de esos "inversores débiles", que mantenía la tensión mínima asociada a la señal 0.

No puede darse por acabado ningún ordenador de aplicaciones generales si carece de memoria. La memoria del computador de Apraful consistía en centenares de elementos especiales de almacenamiento a los que hoy llamaríamos biestables, o *flip-flops*. Salta de nuevo a la vista la notable sencillez de la mentalidad de los aprafulios. En la terminología actual, las dos cuerdas que entran a esa báscula mecánica se denominan posición y reposición [*véase la figura 5*]. Tras pasar sobre un tren de tres poleas, las dos cuerdas se unen, de tal manera que, al tirar de la cuerda posición y llevarla al estado 1, la cuerda reposición se ve arrastrada hacia el interior de la caja y pasa a estado 0. La cuerda que posición y reposición comparten va unida a un resbalón situado en la pared trasera de la báscula. La cuerda de salida, que es prolongación física de la de posición, lleva un grueso retén que se engancha en una muesca tallada en el resbalón. Al tirar de la cuerda posición, el retén cabalga sobre la cuña del resbalón y, cuando la cuerda llega al final de su recorrido, se encaja en la muesca.

En consecuencia, la cuerda de salida queda bloqueada en esa posición hasta que el enorme ordenador altera la situación jalando de la cuerda reposición. Al tirar de ella, el resbalón se desliza hasta liberarse el retén, lo que permite que la cuerda de salida retorne al valor 0. A partir de ese punto, el valor que "recuerda" el biestable es 0.



5. Biestable aprafuliense que les servía como elemento de memoria

¿Cómo se empleaban esos elementos en el ordenador de los aprafulios?

Desconcertados, Ripley y su gente descubrieron en medio del vasto complejo de la computadora una gran explanada, cubierta de hierbas y matojos, de anchura cercana al kilómetro. Apenas enterrados bajo la superficie del terreno hallaron varios miles de cajas de madera putrefacta que contenían básculas, dispuestas en filas de ocho. Ripley, con la ayuda de los arqueocomputólogos, acabó convenciéndose de que el campo debía corresponder a la memoria principal de la computadora. Cada fila de ocho cajas debió constituir una sola "palabra" de ocho bits, igual que las tres cajas de mi ejemplo anterior habrían formado una palabra de tres bits. Ya en ello, imagine el lector una fila de tres biestables con valores 1, 0 y 1: el número 5.

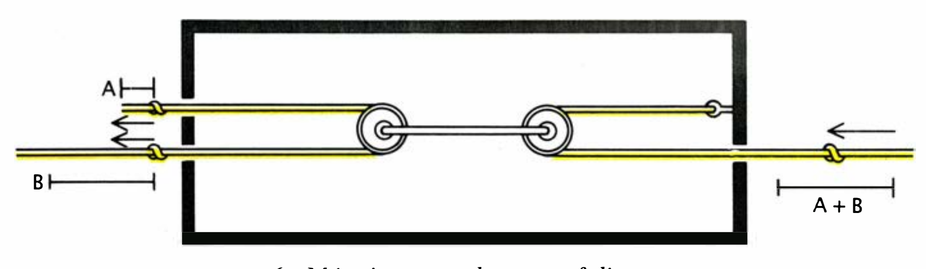
El ordenador habría accedido al contenido de esa palabra concreta de la memoria como sigue: cada biestable de la fila enviaría una cuerda de salida a una caja Y asociada. La otra vía de entrada de esa puerta Y sería una cuerda especial, utilizada para recuperar el contenido de la palabra en cuestión. Cuando se tirase de las cuerdas, las salidas de las puertas Y serían idénticas a las salidas de las básculas. Las cuerdas de las puertas Y conducirían a un gran montaje de puertas O, y de allí a una formación especial de biestables, que podríamos denominar registro. Con un simple tirón de la cuerda asociada a la palabra objeto de examen, se colocaría en el registro el patrón binario de posiciones de las cuerdas.

Sin duda, la unidad lógica principal tendría que encargarse del gobierno del flujo de información, no sólo desde la memoria hacia los registros, sino también entre los registros. En particular, valiéndose de multiplexadores y desmultiplexadores (que realizan operaciones inversas a la de los multiplexadores), el ordenador enviaría configuraciones de bits de unos registros a otros. En un registro especial, que llamaremos aritmético, se combinarían tales configuraciones de acuerdo con las reglas de adición y multiplicación.

Según se cree, la computadora aprafuliense era programable. De ser así, parte de su vasta memoria se utilizaría para almacenar el programa. Asimismo, las instrucciones que componen los programas serían meros conjuntos de configuraciones de ceros y unos, cuya recuperación se efectuaría del modo ya explicado. Tales configuraciones se enviarían en el momento oportuno a un registro de instrucciones, para que las interpretara la unidad lógica.

Por desgracia, desde estas páginas no puedo sino hacer entrever la maravillosa complejidad de la máquina de Apraful. Su funcionamiento nos dejaría atónitos. Dadas las enormes longitudes de soga necesarias, ningún ser humano habría tenido fuerza suficiente para situar las palancas de gobierno en las posiciones adecuadas. La presencia de huesos de elefante en el complejo del ordenador muestra a las claras de dónde procedía la fuerza motriz. Por el extremo de salida, grandes muelles mantenían tensiones adecuadas en las cuerdas del sistema. Cabe en lo posible que la serie final de cuerdas de salida estuviera provista de banderas, que facilitarían a los miembros de la clerecía informática la lectura de los resultados de lo que se estuviera procesando.

El computador aprafuliense, a base de cuerdas y poleas, contrasta poderosamente con el nanocomputador presentado en marzo. Por supuesto, la máquina de cuerdas fue habitante de un distante pasado, en tanto que la nanomáquina se intuye en un brumoso futuro. La computadora aprafuliense es de una escala relativamente grande, pues ocupa millares de hectáreas; el nanocomputador es increíblemente pequeño, y apenas llena una superficie equivalente a la milésima parte del tamaño del núcleo de la célula humana. La mera noción de ambas máquinas es trampolín que nos lanza hacia el reino de la elucubración especulativa, en el cual se combinan y entremezclan ciencia y recreo personal. Detengámonos un momento a pensar, por ejemplo, en el sueño de nuestros días: la creación de máquinas dotadas de inteligencia. Nos resulta más fácil aceptar la posibilidad de una computadora electrónica pensante, dado que, en gran medida, nuestros propios pensamientos se transmiten electrónicamente. Habida cuenta de que cualquier computadora moderna (y su programa) es conceptualmente susceptible de traducción a forma aprafuliense, cualquier artilugio inteligente que pueda desarrollarse, lo mismo ahora que en el futuro, tendrá un equivalente de cuerdas y poleas. ¿Se imagina el lector construido de tal guisa a HAL 9000, el ordenador paranoico de *2001: Una odisea en el espacio*? ¿Estamos dispuestos a admitir que un enorme aparejo de sogas y poleas sea tan inteligente como nosotros?



6. Máquina sumadora aprafuliense

Dejamos la isla de Apraful sin haber podido echar más que un vistazo retrospectivo a su nebuloso pasado: ¿cómo evolucionaron esos enormes ordenadores digitales? A partir de máquinas analógicas, por supuesto. La figura 6 muestra una sumadora analógica, hecha de dos poleas y dos cuerdas. Los dos cabos de una cuerda penetran por la cara anterior de la caja a través de dos agujeros. La cuerda pasa por una de las poleas, que está anclada a la otra mediante un conector axial. Uno de los cabos de la otra cuerda está atado a la pared de la caja. La cuerda pasa por la segunda polea y por un agujero abierto en la pared de la caja. Tal vez a los lectores les divierta descubrir por sí mismos cómo suma este artilugio; tirando de las cuerdas de entrada las distancias a y b respectivamente, la cuerda de salida recorre $a + b$.

Salta a la vista. Pero, ¿cómo se las ingeniarían los aprafulios para multiplicar de forma analógica? Trataré de publicar el diseño más simple que se me envíe. A propósito, debo pedir paciencia a quienes me han escrito y no han recibido respuesta todavía. Aún alcanzo a leer el correo, pero su volumen me impide responder como quisiera a todos los corresponsales.

La mayoría de los programadores (lo mismo novatos que expertos) que se esforzaron por conseguir los efectos descritos en la sección de febrero optaron por quedarse con los gusanos. Sydney N. Afriat, de Ottawa, de quien supe por última vez a resultas de su trabajo en el problema de la torre de Hanoi (en la sección de enero de 1985), dice que la observación de los gusanos resulta particularmente curiosa si el programa se ejecuta en versión compilada.

A Warner Clements, de Beverly Hills, le disgustaba que los gusanos se desmembraran por efecto del arrollamiento (al ser la pantalla equivalente a un toro). En vez de arrastrarse, salir por un borde y reaparecer por el otro, las criaturas del programa de Clements alteran la dirección de su movimiento en +0,25 o −0,25. La elección depende de que la variable *cambio* sea o no mayor que 0,5.

Robert D. Scott, de Madison, puede considerarse ejemplo típico de cierta clase de desafortunados lectores cuyas versiones de BASIC presentan diferencias suficientes respecto de la utilizada por mí para que resulte imposible la ejecución de GUSANOS. Esas diferencias, aunque fatales, son de ordinario muy pequeñas y fáciles de solucionar en cuanto se detectan.

Taller y laboratorio

Cómo levantar el mapa de parches eléctricamente cargados con perejil, salvia, romero y tomillo

Jearl Walker

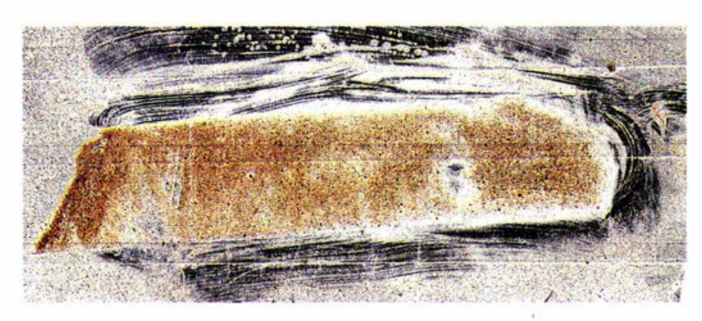
En febrero escribí en esta sección acerca de la luminiscencia eléctrica que se observa (en una habitación oscura y con la vista adaptada a la oscuridad) cuando una cinta adhesiva se despega de una superficie sólida. La acción de arrancar crea parches cargados eléctricamente que se descargan uno sobre otro. Lo que se ve entonces es una luminiscencia tenue azul o azul-blanca en la zona donde se produce la separación entre la cinta y la superficie.

Tras leer mi artículo, David K. Donald, de los laboratorios de investigación y desarrollo que la empresa Hewlett-Packard tiene en Palo Alto, me ha escrito sobre unos experimentos similares que él ha llevado a cabo (y que, desde luego, ha realizado mucha gente durante más de 200 años) para identificar la posición y signo eléctrico de parches cargados en una superficie. En nuestro siglo, esos experimentos ocuparon un puesto destacado en el desarrollo de las fotocopiadoras, que aprovechan la electrostática para atraer un polvo "virador" que realiza las copias. Lo cierto es que Donald acometió la mayoría de sus ensayos cuando trabajaba para la compañía Xerox.

Los experimentos de Donald pueden repetirse en la cocina de casa (cuando la humedad lo permita). Sólo se necesita una superficie no conductora lisa, cinta adhesiva y polvos variados: harina, especias y hierbas culinarias en polvo o el virador de una fotocopiadora. Se fija un trozo de cinta en la superficie y luego se arranca, con lo que quedan en ésta parches cargados. Si entonces se espolvorea, rápidamente, la superficie con la combinación adecuada de dos de los polvos, uno de éstos se agrupará en los parches cargados negativamente; el otro lo hará en los cargados positivamente. Si esos polvos son de colores diferentes, nos brindarán un mapa de la superficie cargada. En las cuatro primeras figuras se muestran algunos de los resultados obtenidos por Donald; los consiguió combinando canela molida con un virador procedente de una fotocopiadora kodak. En todos ellos, la cinta se arrancó tirando hacia la derecha.

Para preparar el experimento, Donald vierte una pequeña cantidad de polvos en un pulverizador de plástico flexible. Añade "perdigones", es decir, cuentecitas de vidrio, tuercas metálicas u otros objetos de esa índole, para impedir que los polvos se agolpen y formen terrones. Al agitar la botella, las partículas de virador se cargan negativamente y, las de canela, positivamente. En uno de sus experimentos habituales aplica luego cinta adhesiva de un tipo u otro a una caja de herramientas de plástico. (El experimento debe realizarse sobre una superficie no conductora —plástico por ejemplo— para que los parches cargados no sean neutralizados inmediatamente por la conducción.) Tras agitar la botella para dejar parte del polvo en suspensión, arranca la cinta; aprieta luego la botella para verter polvo sobre la caja.

Cuando el polvo pasa por encima de la superficie, los campos eléctricos de los parches cargados positivamente atraen el polvo virador suspendido en el aire; los de los parches cargados negativamente capturan la canela. La



1. Mapa de carga obtenido con canela y virador



2. Trayectos de chispas



3. Trayectos de chispas intrincados



4. Figuras apetaladas

aplicación dura alrededor de un segundo, durante el cual el plástico pierde un poco de su carga en la humedad del aire o por conducción. Cuando el polvo se ha depositado, la zona de donde se arrancó la cinta aparece coloreada de marrón por la canela, señal de que la cinta dejó el plástico negativamente cargado. El resto de la superficie del plástico aparece en negro (que es el color del virador); yo lo atribuyo a que, cuando Donald limpió la caja antes del experimento, dejó en ella parches negativamente cargados.

Quien repita el experimento que recorte un poco la boquilla de la botella para que su abertura supere la medida normal. Quizá sea también recomendable recortar el tubo que se adentra en la botella para que el polvo en suspensión sea proyectado con más facilidad por la boquilla cuando se oprima la botella. La boquilla debe mantenerse a unos 10 o 20 centímetros de la superficie a espolvorear. No hay que lanzar polvo en exceso, pero si así se hace, se inclina la superficie de plástico y se golpea levemente para que parte de aquél se desprenda, o bien se sopla con suavidad de un lado a otro de la superficie.

Aunque Donald me avisó del peligro que corría la limpieza de la estancia, la verdad es que mi cocina y mi ropa quedaron cubiertas de un polvo multicolor. Vaya con cuidado: el polvo estropea los ordenadores y sus discos flexibles y el virador hace lo propio con la ropa. Para evitarlo, el experimento puede realizarse dentro de una botella de plástico para refrescos. Se introduce el polvo en la botella, se arranca la cinta adherida al exterior de la botella y se agita ésta. Los campos eléctricos creados por los parches cargados de la superficie exterior atraerán el polvo hacia la superficie interior. Sin embargo, la figura carece de la finura de detalle que se logra con un procedimiento normal.

Además, un inconveniente importante de este procedimiento es que las figuras de polvo no pueden conservarse con el método habitual de Donald, que traslada el mapa pulverulento a capas de cinta nuevas. Lo hace aplicando varias tiras de cinta adhesiva transparente a la superficie empolvada, con las tiras levemente solapadas una sobre otra. Cuando el conjunto de tiras se levanta poco a poco, gran parte del polvo se queda pegado a ellas: hay que oprimir entonces el conjunto sobre una hoja de papel. (Este acostumbra a ser blanco, pero a veces, según los colores de los polvos, es preferible emplear un papel de una coloración más adecuada.) Al





5. Figuras de Lichtenberg: a la izquierda una imagen anódica y, a la derecha, una imagen catódica

transferir el polvo a la cinta, conviene evitar que las tiras deslicen sobre la superficie empolvada. Lo que yo hago es pegar cada extremo de una tira a un dedo de cada mano, bajar la cinta hasta la superficie empolvada, apretar con los pulgares en el centro de la tira y seguidamente deslizar los pulgares hacia fuera, en dirección a los dedos.

El éxito de los experimentos depende de la inamovilidad de las cargas sobre la superficie de la que se arranca la cinta. El vidrio, que es un conductor mediano, da unos resultados deficientes: cuando el polvo se ha asentado ya, las cargas se han disipado, en gran parte por conducción. Una humedad elevada estropea asimismo los experimentos. Aunque el ambiente de la habitación esté seco, la cinta puede hallarse ligeramente "mojada", si ha permanecido expuesta a un ambiente húmedo en los días anteriores al experimento.

Es posible emplear polvos viradores procedentes de otras fotocopiadoras o de impresoras láser, en vez de los polvos kodak; pero a veces la polaridad eléctrica de la canela y del polvo virador puede invertirse. (Hay una prueba sencilla, descrita más adelante, que revela cuál de dos polvos se carga negativamente.) En vez de canela y un virador puede emplearse perejil, salvia, tomillo, comino, harinas diversas y mil productos culinarios más con tal de que estén finamente molidos. Se consiguen unos resultados óptimos cuando los granos son diminutos y de tamaño uniforme, pues entonces las tiras de cinta los recogen íntegramente y conservan la finura de detalles del mapa.

A Donald le gusta trabajar con harina de trigo sin blanquear, pues carece de las propiedades magnéticas de algunos viradores que pueden emborronar un mapa de cargas. Otros polvos de cocina no dan buenos resultados. Así, el polvo de mostaza es demasiado transparente; el café y la harina de maíz, demasiado gruesos, incluso después de molidos. Deben evitarse los polvos cuyo índice de refracción sea igual al de la cinta, pues entonces el polvo será invisible en el mapa levantado. Algunas combinaciones de polvos dan mejores resultados que otras, dada la manera en que interactúan cuando se cargan por agitación. Así, la pimienta triturada posee un color llamativo, pero sólo surte efecto con virador; cuando, por ejemplo, se agita con harina, los granos de cargas opuestas se atraen entre sí con tal intensidad que hacen caso omiso de las cargas superficiales y se depositan uniformemente sobre el área ensayada.

Cuando se arranca la cinta del plástico, puede ocurrir que a lo largo de las superficies salten pequeños aludes de electrones, sin que se cree una auténtica chispa (que está constituida por una columna completa de aire ionizado). Para favorecer la formación de chispas, Donald colocó bajo la cinta una tira estrecha de pan de aluminio con el extremo derecho recortado en punta. Su razonamiento era que, al arrancar la cinta con el pan adherido, los campos eléctricos establecidos en los bordes de éste, y especialmente en el extremo puntiagudo, podrían ser lo bastante intensos para ionizar el aire.

Cuando empolvó el plástico, Donald vio que acudía poca cantidad al lugar donde había estado el pan, señal de que allí el plástico era eléctricamente neutro. En casi toda la zona de donde la cinta se había arrancado del plástico, aparecía el color marrón de la canela, como en los ensayos anteriores. Ahora bien, donde habían estado los bordes del pan se veían unas huellas arborescentes, parecidas a relámpagos, coloreadas de negro por el virador; debieron generarse chispas en el aire, encima mismo del plástico, extrayendo

electrones de éste y dejando las huellas positivamente cargadas. En algunos ensayos, Donald encontró unas figuras negras en forma de abanico donde habían estado los bordes del pan. Esas formas se deben al efecto corona, una ionización del aire que no se transforma en chispa.

En estos experimentos de Donald sobre las chispas y la corona podemos siempre anticipar qué polvo de una combinación es el negativo. Será aquel que se agrupe formando huellas arborescentes o en abanico, allá donde la ionización del aire haya dejado zonas cargadas positivamente.

He puesto a prueba esta técnica con una combinación de dos polvos Day-Glo, el Rojo Neón y el Amarillo Saturno. Varios experimentadores habían descubierto que los polvos Day-Glo, de colores brillantes, son muy eficaces para definir parches cargados. Cuando los esparcí sobre un plástico del que había arrancado una cinta con pan, el polvo rojo se agrupó formando huellas arborescentes, revelando que había estado cargado negativamente.

Donald crea una distribución de cargas completamente diferente cuando arranca de una película de triacetato de celulosa la cinta adhesiva. Parte del mapa que levanta en el acetato es negro, a causa del virador, pero aparecen también zonas apetaladas de un marrón apagado, casi diáfano. En estos pétalos, el lado izquierdo es estrecho y curvo y, el derecho, más ancho y recto. (Recuérdese que se arranca de izquierda a derecha.)

Explica Donald que, mientras se arranca, el acetato se va cargando positivamente y la cinta negativamente. Cuando la diferencia de carga adquiere una magnitud suficiente comienzan a fluir electrones de la cinta al acetato y lo neutralizan. La descarga se inicia en una zona estrecha; ésta será el lado izquierdo de un pétalo cuando después se empolve el acetato. Conforme la descarga se extiende de un lado a otro del ancho de la cinta, la zona casi neutralizada se ensancha. Cuando la diferencia de carga entre la cinta y el acetato mengua mucho, la descarga cesa de repente y se forma el lado derecho del pétalo. Al proseguir con el despegue, se restablece la diferencia de carga, hasta que la descarga se reanuda y se forma otro pétalo.

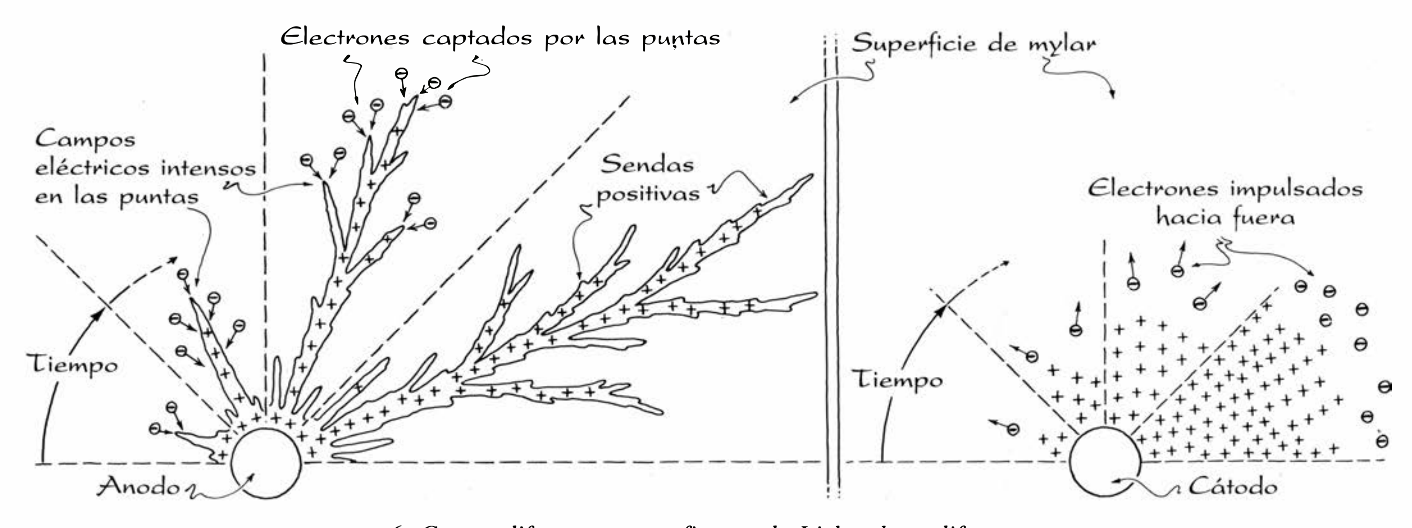
En algunas superficies, la cinta adhesiva se desprende en una secuencia de adherencia-deslizamiento, produciendo en el mapa de cargas una serie de estrías a lo ancho de la franja de la que se arrancó la cinta. Pueden crearse asimismo interesantes parches cargados cuando la cinta se arranca de otra cinta, fenómeno que se produce si se saca cinta adhesiva de su propio rollo. Tras extraer un poco de cinta, espolvoréese de la manera habitual y luego colóquese encima otra tira como protección. (Hay que espolvorear rápidamente, ya que la cinta es parcialmente conductora.)

Tal como ya les he mencionado, la técnica para empolvar materiales que hayan estado sometidos a descargas y chispas se remonta muy atrás en el tiempo; fue descubierta, en 1777, por Georg Christoph Lichtenberg, de la Universidad de Göttingen, al observar que, cuando sobre una torta de resina que hubiera estado chispeando aleteaba polvo, los granos de éste se agrupaban y creaban unas hermosas figuras que hoy llevan su nombre. Poco después alguien se dio cuenta de que una mezcla de dos polvos podía revelar la polaridad de las cargas contenidas en una superficie que hubiera estado chispeando. Cuando se criban azufre y minio (pigmento rojo anaranjado, constituido por una mezcla de óxidos de plomo) a través de la malla de un saco de muselina, el primero colorea de amarillo las zonas positivas y el segundo colorea de rojo las zonas negativas.

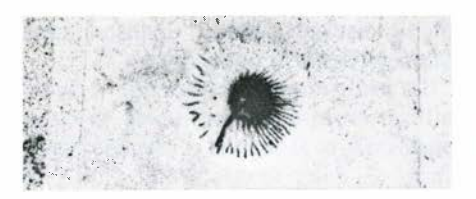
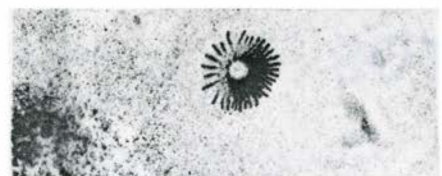
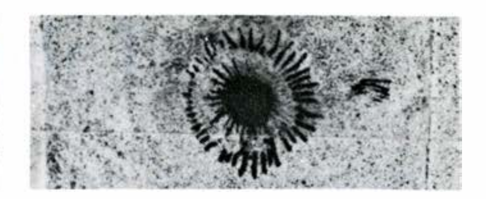
En nuestro siglo, las figuras de Lichtenberg han servido para poner de manifiesto de qué modo se desarrollan las descargas y las chispas. Hay numerosos experimentos en que un electrodo estrecho se coloca encima de otro electrodo ancho y plano, cubierto de una sustancia aislante de poco espesor, conectándose ambos a un dispositivo capaz de producir una descarga repentina entre ellos. Seguidamente, la capa aislante se espolvorea y revela figuras de Lichtenberg.

La forma de estas figuras depende de la naturaleza de la descarga. Si el electrodo estrecho es el ánodo (es decir, si su tensión eléctrica es mayor que la del otro), la figura, que se llama imagen anódica, se compone de numerosas líneas arborescentes y ramificadas que irradian del punto situado exactamente en la vertical del ánodo. Si el electrodo estrecho es el cátodo (su tensión eléctrica es menor que la del otro), la imagen catódica resultante dibuja un parche circular compuesto de gran número de líneas, muchas veces demasiado estrechas para poderlas distinguir con nitidez.

Con las orientaciones de Donald, me propuse producir algunas figuras de Lichtenberg en la biblioteca de mi universidad. Durante los días invernales de baja humedad, la biblioteca es famosa por las chispas que se generan cuando alguien camina por el suelo en-



6. Cargas diferentes crean figuras de Lichtenberg diferentes

7. Figuras de Lichtenberg obtenidas sosteniendo con la mano una cabeza de alfiler (**izquierda**)*, una punta de alfiler* (**centro**) *y la punta de unas tijeras* (**derecha**)

moquetado y luego se acerca a una puerta o estantería metálicas; el chispazo es muchas veces tan intenso que se siente, e incluso se oye. Decidí, pues, que de tal molestia podría extraerse al fin algún provecho. Mi dedo, ¿es un ánodo o un cátodo? Consiguiendo que el chispazo creara una figura de Lichtenberg, podría saberlo.

Con tiras de cinta adhesiva sujeté un pequeño cuadrado de mylar al costado de una gran estantería metálica. Luego me paseé por el piso, arrastrando los pies y balanceando además los brazos para que mi cuerpo se cargara tanto por el frotamiento de la ropa con mi piel como por mis movimientos sobre la moqueta. A continuación regresé al parche de película de plástico y levanté el dedo hasta él, produciéndose una descarga suave. Rocié rápidamente el mylar con virador Xerox y comino: me encontré con una imagen negra de un centímetro de ancho aproximadamente. Era complicada, pero parecía poseer unas líneas arborescentes que irradiaban desde el lugar que yo había tocado con el dedo, lo que indicaba que yo había actuado de ánodo. Levanté la imagen con cinta adhesiva y la guardé entre las hojas de mi libreta.

En otras repeticiones del experimento, acerqué al mylar una llave, alfiler o la punta de una hoja de tijeras, en la creencia de que una punta aguda crearía un campo eléctrico más intenso y una descarga más fuerte que la del romo extremo de mi dedo. Desde luego, y pese a la capa de película plástica, se formaron a veces chispas visibles y audibles. En todos los casos, el mylar empolvado reveló una imagen anódica: finas líneas arborescentes que irradiaban desde el lugar que la punta había tocado. Así, pues, al pasearme por la biblioteca, mi cuerpo perdía electrones y se cargaba positivamente. De vuelta a mi laboratorio, pude crear imágenes catódicas sobre cuadrados de mylar valiéndome de generadores electrostáticos del tipo de los usados en las clases de física.

Las imágenes anódicas y catódicas difieren a causa de la manera en que fluyen las cargas sobre el mylar durante la descarga. Cuando encima de la película se coloca un ánodo estrecho, los electrones procedentes de la película y del aire inmediatamente contiguo a aquélla fluyen hacia el punto situado debajo mismo del ánodo; seguidamente, se precipitan hacia él en aludes o chispas. En la superficie de la película, y en el aire contiguo a ella, se generan así unas sendas formadas por iones positivos, inmóviles o muy lentos; éstos serpentean hacia fuera desde el punto situado bajo el electrodo. A medida que las sendas se alargan, los intensos campos eléctricos que hay en sus puntas captan más electrones, que pasan entonces al ánodo. Después de la descarga, queda en el mylar una imagen de esas tortuosas sendas positivamente cargadas. La diferencia de tensión inicial entre el ánodo y el cátodo, éste bajo la película, determina la anchura de la imagen; cuanto mayor es la diferencia de tensión, mayor es la anchura.

Si, por contra, colocamos encima del mylar un cátodo estrecho, la descarga se compone de una serie de aludes o chispas que envían electrones hacia la película, donde se dispersan radialmente hacia fuera. Cuando los electrones de la película y del aire inmediatamente contiguo se unen al flujo hacia fuera, el mylar situado bajo el cátodo se carga positivamente y comienza a enmascarar el campo eléctrico del cátodo debido a los electrones salientes. Según cual sea la distribución de cargas real, los electrones periféricos sufrirán entonces unas fuerzas no radiales y se esparcirán hacia fuera en muchas direcciones. No se forman sendas. Cuando cesa la descarga, la zona positivamente cargada del mylar, situada bajo el cátodo, es casi circular, con un diámetro que depende de la diferencia de tensión inicial entre el cátodo y el ánodo.

En los experimentos de la biblioteca aparecieron dos imágenes desconcertantes. Una de ellas la creaba el alfiler. Cuando acercaba su cabeza al mylar, se generaba la imagen anódica normal. Pero, si arrimaba la punta, la imagen anódica presentaba un centro muy bien definido. Sospecho que la punta perforaría la película, permitiendo así que electrones procedentes de la estantería pudieran neutralizar el centro de la imagen. El otro motivo de sorpresa fue que una punta aguda dejaba muchas veces dos imágenes, una dentro de la otra, con una zona despejada entre ambas. Las figuras eran siempre imágenes anódicas. En mi opinión, una descarga inicial producía la imagen mayor; muy poco después, cuando el temblor natural de mi mano acercaba más la punta al mylar, una segunda descarga menor producía la imagen más estrecha; podría ocurrir entonces que la reunión de electrones correspondiente a esta segunda descarga borrase parte de la primera imagen.

Quizás algún lector pueda encontrar interesante poner a prueba mi interpretación de esas extrañas imágenes; o prefiera entretenerse en rastrear descargas adicionales en las figuras de Lichtenberg. Ocurre a veces que las nubes de electrones existentes en el perímetro de una imagen se descargan cuando desaparece la diferencia de tensión entre los electrodos. Consideremos, por ejemplo, el dispositivo común que se emplea en la creación de una imagen catódica. Cuando, hacia el final de la descarga, cae la diferencia de tensión, los electrones exteriores a la imagen podrían desplazarse a zonas positivas de la imagen, dejando un rastro positivo en la superficie del mylar. Tal descarga podría ser insignificante o constituir una auténtica chispa.

Las cargas electrostáticas facilitan la realización de una constelación de experimentos. Cuando arrancamos papel de plástico de su propio rollo, u otra superficie, suelen quedar parches cargados. Asimismo, la ropa lavada y secada a máquina sin ninguna sustancia antiestática suelta frecuentemente chispas. ¿Puede producirse una figura de Lichtenberg con ayuda de un gato al que se haya cargado electrostáticamente frotándole la piel? Recibiré con agrado cualquier noticia de experimentos realizados en esta ya trillada y polvorienta parcela de la física.

Libros

Definición de la biología, teoría de catástrofes, diseño de máquinas y fitología fundamental

Luis Alonso, Emili Elizalde, Juan Ignacio Cuadrado y Ginés López

Defining biology. Lectures from the 1890s. Edición preparada por Jane Maienschein. Harvard University Press, 1986.

Este año hace un siglo que se inauguraba el laboratorio de biología marina de Woods Hole. Por sus mesas han pasado generaciones de biólogos de todas las especialidades y tendencias, que lo convirtieron, muy pronto, en un centro equiparable a la mítica estación de Nápoles o la de Banyuls, para superarlas escasos años después. Sabido es que los institutos de biología marina promovieron y apuntalaron el desarrollo de la embriología, epigenética, microbiología y sistemática del siglo xx. Fueron a esas ramas del tronco biológico lo que los jardines botánicos a la fitología y farmacología.

La historia de Woods Hole va asociada a la impronta que le confirió su primer director, Charles Otis Whitman (1842-1910), un zoólogo alumno de Agassiz y Leuckart, que fue contratado por la Universidad de Tokyo y recorrió distintos laboratorios europeos antes de aceptar la jefatura de Woods. Llevó allí varios colegas y colaboradores, entre ellos a Jacques Loeb, de cuyo radicalismo se hallaba, no obstante, muy alejado. Se trajo sobre todo el espíritu y la letra del rótulo de Agassiz que pendía de las estanterías de la biblioteca: "Study nature not books". Lo que no implicaba, ni de lejos, un burdo empirismo. Se trataba sobre todo de poner a prueba, en el banco del laboratorio, las múltiples teorías que bullían en la Europa finisecular, con muchas palabras, pocos datos y cierta dosis de "radicalización unidimensional", por usar la expresión de Ernst Mayr.

A partir de 1890 instaura las conferencias magistrales. El libro que reseñamos recoge algunas de las pronunciadas en la primera década de la serie, las que considera más representativas del derrotero que habría de seguir la biología desde entonces. Dominan los temas de orientación general o los problemas fundamentales. Maienschein resume en la introducción la opinión de Whitman sobre la especialización necesaria en biología sin perder de vista la perspectiva holista, ahorrándose así reproducir las dos conferencias iniciales. Ese enfoque que apunta hacia el núcleo de la cuestión y el punto de instalación a medio camino entre el materialismo y el vitalismo sintetizan la postura dominante.

Quizá las mejores páginas del libro correspondan a la embriología. La interpretación de los experimentos que rechazan la hipótesis haeckeliana de la gastrea o la teoría de la herencia en mosaico de Roux y Weismann, así como la explicación de la regeneración y de la segmentación de acuerdo con los datos entonces disponibles merecen inscribirse en los textos clásicos de historia de la ciencia. Además, Whitman logra traer al terreno de la biología apartados que se suponían reservados para otras disciplinas: el instinto, el aprendizaje, el sustrato nervioso de los hábitos, etcétera, comienzan a dejar a la intemperie el verbalismo pseudocientífico que los envolvía para reinterpretarse en un lenguaje mecanicista, insuficiente según luego se vería.

Como toda obra bien hecha —dejando de lado el criterio de selección de algunas lecciones—, ésta ofrece muchas vertientes más: un Morgan morfólogo antes de sentar las bases de la genética cromosómica, por ejemplo. El libro, prologado por Mayr, lo cierra en un epílogo recopilador Paul R. Gross. (L. A.)

Teoría de catástrofes, por V. I. Arnold. Alianza Editorial; Madrid, 1987.

El autor ruso V.I. Arnold nos tiene acostumbrados a obras muy serias en diversos campos de la matemática, así como en alguno de la física teórica. El libro que aquí comentamos sigue en muchos sentidos la pauta marcada en sus otros trabajos: rigor, seriedad y precisión llevados al máximo grado posible, sobre todo tratándose esta vez de un tema que en muchas otras ocasiones ha sido abordado con criterios radicalmente distintos, incluso opuestos a los que acabamos de mencionar.

La propia nomenclatura que se suele utilizar en este campo induce, si no al equívoco, sí al menos a una predisposición de quien se adentra en el mismo hacia un determinado sentido. Lo que se pretende con ello es muchas veces impulsar descaradamente un marketing, que si bien no les viene mal a las obras científicas (tan a menudo absolutamente huérfanas del mismo) puede llegar a desvirtuar el verdadero carácter de una obra valiosa. Así, tal como se recoge en el prólogo de la primera edición rusa del libro que nos ocupa, el *New York Times* afirmaba, en un reportaje publicado en noviembre de 1977, sobre la teoría de catástrofes: "los expertos discuten sobre el pronóstico de desastres".

Según el propio autor, sus objetivos al escribir el libro han sido explicar lo que es la teoría de catástrofes, por qué levanta tanta controversia, intentando desarrollar la esencia de los resultados fundamentales de la misma: los resultados de las teorías matemáticas de las singularidades y de la bifurcación y sus aplicaciones. Todo ello pensando en lectores que tengan "una base matemática mínima, pero, eso sí, una mente despierta".

En los cursos escolares que impartimos a nuestros alumnos de métodos matemáticos o matemáticas aplicadas a las diversas ramas de las ciencias, acostumbramos demasiado a menudo a trabajar con funciones "suaves", es decir, diferenciables en el dominio en que se las considera cierto número de veces. Las singularidades no suelen tener cabida en las lecciones del curso. Esta actitud no es del todo correcta en la actualidad. En las últimas décadas, la teoría de las singularidades ha alcanzado un desarrollo extraordinario, gracias en parte a las contribuciones de H. Whitney, R. Thom y J. Mather. Es por ello por lo que el presente libro puede perfectamente considerarse un complemento indispensable para aquellos que hayan seguido tales cursos en facultades y escuelas universitarias españolas.

En muchas ocasiones no resulta fácil distinguir los términos "singularidades", "bifurcaciones" y "catástrofes". El autor tiene razón al observar que algunos consideran la teoría de catástrofes una parte de la teoría de las singularidades, mientras que otros incluyen la teoría de las singularidades dentro de la teoría de las catástrofes. El autor no se dedica a lucubrar sobre este punto. En sus propias palabras, las catástrofes son cambios bruscos que surgen como respuesta repentina de un sistema a un

cambio suave de las condiciones externas. Como antes he anunciado, el texto es muy serio y no puede alinearse con tantos otros que se acercan al tema desde una óptica filosófica o poética, formulando sus proposiciones de tal manera que resulta imposible decidir si son o no ciertas desde el punto de vista estrictamente matemático. Puede afirmarse que la teoría de catástrofes ha sido la teoría más famosa y difundida de los años 70, del mismo modo que la teoría de los fractales y multifractales lo es en los años 80. Los artículos de R. Thom fueron reimpresos como libros de bolsillo, algo que no había ocurrido en matemáticas desde la aparición de la cibernética, exactamente igual que sucede ahora con los artículos y libros de B.B. Mandelbrot.

Ahora bien, el texto de Arnold no hace la más mínima concesión a la galería. Está escrito en un lenguaje matemáticamente muy riguroso y discute sólo resultados demostrados con arreglo a tal criterio. Las críticas que dedica a los seguidores de esa otra corriente mucho más popular, y carente de precisión, que aborda y generaliza los problemas de la teoría de catástrofes con demasiada alegría, son constantes y las fundamenta con ejemplos concretos.

Que nadie se llame, pues, a engaño sobre el carácter del libro, al que yo situaría entre los de divulgación matemática avanzada. No es de los que se puedan leer en la cama para intentar conciliar el sueño. Muy al contrario, pese a la ausencia total de fórmulas matemáticas (que tanto asustan a algunos), se requiere una concentración mental absoluta para asimilar gran parte de su contenido. De todos modos, si uno no persigue una comprensión profunda de la teoría de catástrofes, una lectura más superficial puede resultar también muy ilustrativa, saltándose bastantes páginas, incluso algún capítulo entero.

Un rápido repaso al índice del libro nos proporciona una información fidedigna sobre su contenido: 1) singularidades, bifurcaciones y catástrofes; 2) teoría de las singularidades de Whitney; 3) aplicaciones de la teoría de Whitney; 4) una máquina de catástrofes; 5) bifurcaciones de estados de equilibrio; 6) pérdida de estabilidad del equilibrio y de los modos de comportamiento autooscilantes; 7) singularidades de la frontera de estabilidad y el principio de la fragilidad de las cosas buenas; 8) cáusticas, frentes de onda y sus metamorfosis; 9) la distribución a gran escala de la materia en el universo; 10) singularidades en los problemas de optimización: la función máximo; 11) singularidades en la frontera de asequibilidad; 12) superficies suaves y sus proyecciones; 13) el problema de evitar un obstáculo; 14) geometría simpléctica y de contacto; 15) singularidades complejas y 16) el misticismo de la teoría de las catástrofes.

Como ya he dicho, el libro es riguroso. Coincido con el autor en que los propios expertos hallarán hechos e ideas que les resulten nuevos. Según se desprende del índice, se ocupa de muchos temas, a veces demasiado concisos para quien pretenda considerar la obra un tratado de la teoría de las catástrofes. Por poner un ejemplo de gran actualidad y en el que he estado trabajando últimamente, el capítulo dedicado a la distribución a gran escala de la materia en el universo, una de las aplicaciones importantes de la teoría de catástrofes, es, pese a su título largo y prometedor, extremadamente sucinto. Al leerlo, son muchísimas las preguntas que acuden a nuestra mente y que quedan sin respuesta.

Nos hallamos, en realidad, frente a una guía de la teoría de catástrofes. En efecto, dieciséis de las páginas del libro conforman una bibliografía comentada a los diversos temas que en él se tratan. Considero un gran acierto que, siguiendo los consejos de M. Berry, el autor haya añadido a esta edición de su libro la citada bibliografía comentada. Resultaría ahora difícil imaginar a esta obra sin ella. Es más, para una localización inmediata de las referencias originales en las que están demostrados los resultados y teoremas que se enuncian en el texto, se echa a faltar la numeración de las citas a la que estamos acostumbrados en nuestras consultas de la bibliografía especializada.

Como lectura inicial, antes de sumergirnos en este libro, no estaría de más dar un repaso a los conceptos básicos de la topología en R^3 y R^n, sobre todo al concepto de homeomorfismo, así como también a los resultados ya clásicos de la teoría de Poincaré de las singularidades de las ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden y a los de la teoría de la estabilidad de Poincaré y Lyapunov. Aunque la teoría de catástrofes no deriva directamente de estas ideas, ellas constituyen resultados fáciles de encontrar en muchos libros y cuyo conocimiento nos proporcionará cierta base para adentrarnos en la misma. (E.E.)

Elementos de máquinas, por G. Niemann. Editorial Labor; Barcelona, 1987.

Nos encontramos ante la traducción de la última edición en alemán de un libro clásico en la bibliografía del cálculo de elementos de máquinas. La primera edición en castellano apareció hace ya veinte años; se trata, pues, de un libro bastante conocido por los técnicos relacionados con el diseño de máquinas y mecanismos. Mantiene una estructura tradicional: unas bases previas, con nociones sobre el proceso de diseño, materiales y procesos de fabricación; y una descripción de elementos, con sus aplicaciones y métodos de cálculo.

Al ser un libro clásico, reseñaremos sólo las variaciones más importantes que se han incorporado. Comienza con un análisis global de las diferentes fases del diseño, en donde introduce algunas herramientas actuales como el CAD (diseño asistido por computador) y el análisis del valor para la fase de evaluación de alternativas.

En el capítulo segundo, "Reglas de diseño", se relacionan diferentes puntos de vista a la hora de abordar el diseño. Empieza con la descripción del esquema básico de las fases del proyecto, al que se añaden otras cuestiones importantes: criterios ergonómicos; diseño de piezas estampadas e inyectadas de material plástico; diseño del producto, línea y color, y vibraciones y ruido. Viene luego un resumen sobre el comportamiento de los materiales, y se detiene en los fallos de carácter estático y dinámico. Cabe destacar la reelaboración de este material, sobre todo en la parte dedicada al fenómeno de fatiga, de tanta relevancia en el diseño de máquinas.

Una restricción importante en el diseño es muchas veces el peso o la cantidad de material utilizado. De acuerdo con esa consideración, en el capítulo dedicado a la construcción ligera se añade un nuevo apartado que trata de la utilización de materiales plásticos y compuestos. Se relacionan después los materiales habituales y sus propiedades características. En este capítulo aparece una amplia referencia a los materiales plásticos. En el apartado donde se estudian las normas, tolerancias y superficies se incluyen algunas cuestiones sobre microgeometría y macrogeometría de las superficies.

En el grupo de capítulos consagrados a las uniones, se nos ofrecen las uniones por soldadura, remaches, tornillos, pernos y pasadores. De este conjunto de capítulos, aparte de cierta remodelación y actualización del material, cabe destacar la inclusión de una parte dedicada a las uniones por pegado. El resto de la obra se ocupa, entre otros elementos, de los resortes elásticos, sistemas de rodadura, rodamientos, con-

juntos de deslizamiento, ejes y árboles, uniones de árboles y cubos y uniones de árbol con árbol. Relación que se completará con la aparición de los volúmenes restantes. No hemos de pasar por alto el capítulo que estudia los lubricantes, la lubricación y la estanqueidad, donde aparecen nuevas referencias a las propiedades de los lubricantes, ensayos y retenes. (A lo largo de todo el libro y sobre todo en los ejemplos de cálculo, se utiliza el sistema SI de unidades.)

Podríamos decir, a modo de conclusión, que "el Niemann" sigue siendo una fuente de datos y de métodos de cálculo imprescindible para el diseñador mecánico. (J.I.C.).

Biología Vegetal. Introducción general de José Miguel Barea. Prensa Científica, S.A.; Barcelona, 1988.

Se reúne en este libro una interesante selección —realizada por el profesor de investigación del C.S.I.C. José Miguel Barea— de artículos de divulgación científica, de las disciplinas de bioquímica, fisiología vegetal, mutualismo, genética, evolución y ecología, publicados en los últimos años en *Investigación y Ciencia*. La estructura de los artículos, el formato de la obra y la calidad de edición son los habituales de la revista, lo que asegura una lectura fácil que se ve bien apoyada por las numerosas fotografías, gráficas, tablas y figuras con que vienen ilustrados todos los capítulos.

Tras una introducción más o menos breve a cargo del autor de la selección, los artículos se han agrupado en cuatro grandes capítulos o apartados: Bioquímica y fisiología, Simbiosis microbio-planta, Genética y evolución y Ecología. Como apéndice figuran unas breves reseñas biográficas de los responsables de los artículos, en el apartado "Los autores", y un corta bibliografía, independiente para cada artículo, en la que se recogen las obras que, en opinión de los autores, resultan relevantes sobre el tema; en general se trata de libros o artículos de revistas científicas que probablemente serán de difícil acceso para una gran mayoría de los lectores españoles, cosa, por otra parte, casi inevitable. Un índice temático bastante completo, en el que se incluyen los autores citados en el texto, permite una localización sencilla de los distintos asuntos tratados.

En el capítulo de Bioquímica y fisiología se incluyen tres artículos referentes a diversos aspectos del proceso de transformación de energía luminosa en química en la fotosíntesis. En el primero de ellos —"La membrana foto-

sintética", por K.R. Miller, publicado en diciembre de 1979—, se describe, de forma clara y didáctica, la fase luminosa de la fotosíntesis tomando como base el diseño y la función del punto de los cloroplastos en que ésta tiene lugar: la membrana de los tilacoides. En el segundo —"Asimilación de CO_2 (del carbónico) por la planta", por A. Pla et al., publicado en marzo de 1985—, se explica el proceso bioquímico de la fotosíntesis, haciendo especial hincapié en la necesidad de la luz para la activación de algunas enzimas del ciclo de Calvin que intervienen en la denominada "fase oscura". En el último artículo de esta serie —"Mecanismo molecular de la fotosíntesis", por D.C. Youvan y B.L. Marrs, publicado en agosto de 1987—, se describe el proceso de la fotosíntesis desde el punto de vista de la genética molecular y se comentan los avances logrados últimamente con la ayuda de la espectroscopía y cristalografía de rayos X.

Completan este primer capítulo de Bioquímica y fisiología el artículo "Respuesta de las raíces a la gravedad", por M.L. Evans, R. Moore y K.H. Hasenstein, publicado en febrero de 1987, donde se explica el curioso mecanismo que posibilita la curvatura de las raíces huyendo de la luz, y "Fibras ópticas vegetales", por D.F. Mandoli & W.R. Briggs, publicado en octubre de 1984, en el que se describe la inusitada permeabilidad a la luz que presentan determinados tejidos de plantas jóvenes y la importancia fisiológica de este fenómeno.

En el capítulo II, Simbiosis microbio-planta, los tres primeros artículos —"Simbiosis *Rhizobium*-leguminosa", por C. Azcón y G. de Aguilar, publicado en julio de 1983; "Mecanismo de nodulación de las leguminosas", por G. Soberón, publicado en abril de 1985 y "Limitaciones de la fijación biológica de nitrógeno", por E. J. Bedmar y J. Olivares, publicado en febrero de 1982— tratan de diversos aspectos de la conocida asociación mutualista de las bacterias del género *Rhizobium* con las raíces de leguminosas, asociación que hace posible la fijación del nitrógeno atmosférico en una forma asimilable por las plantas. En el último artículo del capítulo —"Micorrizas", por C. Azcón, G. de Aguilar y J. M. Barea, publicado en agosto de 1980— se describe la asociación simbiótica de las hifas de hongos con raíces de plantas superiores —las denominadas "micorrizas", que facilitan la asimilación del fósforo— resaltando su valor potencial para la agricultura.

El capítulo III, Genética y evolución, contiene 5 artículos de entre los cuales tal vez merezca ser destacado el último, "Un vector para introducir genes en vegetales", por M. D. Chilton, publicado en agosto de 1983, donde se describe la curiosa habilidad de la bacteria *Agrobacterium tumefaciens*, que le permite introducir segmentos de ADN en el núcleo de células vegetales, induciéndolas a fabricar nuevas substancias, útiles para la bacteria, que no son propias de la maquinaria metabólica normal de la célula; se resalta el interés que presenta este proceso en investigación básica y su valor potencial en ingeniería genética para la mejora de cosechas. En "El origen del maíz", por P. C. Mansgelsdorf, se pasa revista a los posibles antepasados del maíz moderno, concluyendo que, en opinión del autor, pudo haberse originado por hibridación de una especie perenne (*Zea diploperennis*) con un maíz duro tunicado —con los granos envueltos en una cubierta— primitivo.

"Los recursos genéticos del trigo silvestre", por M. Feldman y E. R. Sears, publicado en marzo de 1981, plantea el problema —muy extendido en las plantas cultivadas— de la reducción de la variabilidad genética del trigo como resultado del desarrollo de las prácticas modernas de mejora y destaca la posibilidad de aprovechar especies silvestres próximas —de los géneros *Triticum, Secale* y *Agropyrum*—, mediante transferencia de material génico, para la mejora genética futura de los trigos cultivados. "Elementos genéticos transponibles del maíz", por N. V. Fedoroff, publicado en agosto de 1984, trata de los últimos avances en el estudio de los genes móviles, descubiertos en el maíz —responsables de las mutaciones inestables que pueden afectar a las semillas de determinadas razas de la planta—, y su posible participación en el proceso evolutivo a gran escala. En "Control genético de las proteínas del trigo", por F. García Olmedo y P. Carbonero Zalduegui, publicado en junio de 1983, se describen los grupos de proteínas existentes en el endosperma del grano de trigo, sus propiedades nutritivas y valor tecnológico, así como las nuevas perspectivas que se abren ante la posibilidad de su manipulación genética tras los últimos avances en el campo de la biología molecular.

El capítulo IV y último está dedicado a la Ecología, con temas de ecoedafología, silvicultura, ecología forestal y paleoecología. "El humus", por J. F. Gallardo, publicado en julio de 1980, describe la materia orgánica del suelo que no se mineraliza por completo —el humus, con los distintos tipos de substancias húmicas— y su papel en la evolución de los suelos y la nutrición vegetal. "Silvicultura", por S. H. Spurr, publicado en abril de 1979, trata del "cultivo de los bosques" y de la posibilidad de doblar o triplicar su productividad mediante una gestión planificada y moderna que evite los "bosques monoespecíficos de la misma edad" y los métodos de cultivo "violentos".

En "Ecología del bosque esclerófilo mediterráneo", por A. Escarré et al., publicado en agosto de 1984, se describen diversos aspectos ecológicos de los encinares de Prades y del Montseny, que son el resultado del trabajo personal de los autores y representan una de las pocas investigaciones sistemáticas de ecología que se llevan a cabo sobre nuestras formaciones boscosas mediterráneas; incluye comentarios sobre temas de tanta actualidad como la lluvia ácida.

"Fragilidad de la pluvisilva amazónica", por C. Uhl y J. Saldarriaga, publicado en octubre de 1986, plantea el grave problema ecológico que supone la destrucción de los bosques de lluvia amazónicos cuya regeneración es dificilísima y muy lenta debido a la extremada pobreza del suelo; en el artículo se explican las conclusiones alcanzadas tras las experiencias realizadas por los autores en San Carlos de Río Negro (Venezuela).

Finalmente, en el último artículo del apartado de Ecología y del libro —"Reconstrucción del ambiente a través de los granos de polen", por M. L. Salgado-Labouriau, publicado en septiembre de 1984— se describe, de forma muy genérica, la aplicación de los depósitos fósiles de granos de polen para reconstruir los ambientes vegetales y el clima de épocas pasadas, aportando algunos datos concretos relativos al lago de Valencia (Venezuela). El artículo contiene alguna expresión chocante, como el afirmar que los granos de polen son "gametos masculinos de las plantas superiores".

Como conclusión, se puede decir que se reúnen en este libro una serie de artículos de divulgación, la mayoría didácticos y bien ilustrados, que cubren una gama amplia de temas de Biología Vegetal, muchos de ellos de interés y algunos de franca actualidad. Puede ser muy útil para los estudiantes de distintas facultades y escuelas e interesados en temas relacionados con las plantas, a los que les puede resultar gravoso el adquirir todos los números de la revista y, también, de recopilación de fácil manejo para los incondicionales de *Investigación y Ciencia*. (G. L.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

MUSICA POR ORDENADOR

THE TECHNOLOGY OF COMPUTER MUSIC. Max V. Mathews, Joan E. Miller, F.R. Moore, J.R. Pierce y J.C. Risset. The M.I.T. Press, 1969.

THEORY AND APPLICATION OF DIGITAL SIGNAL PROCESSING. Lawrence R. Rabiner y Bernard Gold. Prentice-Hall, Inc., 1975.

THE ACOUSTICAL FOUNDATIONS OF MUSIC. John Backus, W.W. Norton & Company, Inc., 1977.

THE BYTE BOOK OF COMPUTER MUSIC. Dirigido por Christopher P. Morgan. BYTE Books, 1979.

LO PROPIO, LO AJENO Y LA AUTOINMUNIDAD

IMMUNIZATION TO INSULIN GENERATES ANTIIDIOTYPES THAT BEHAVE AS ANTIBODIES TO THE INSULIN HORMONE RECEPTOR AND CAUSE DIABETES MELLITUS. Irun R. Cohen, Dana Elias, Ruth Maron y Yoram Schechter en *Idiotypy in Biology and Medicine,* dirigido por Heinz Köhler, Jacques Urbain y Pierre-André Cazenave. Academic Press, Inc., 1984.

T LYMPHOCYTE CLONES ILLUMINATE PATHOGENESIS AND AFFECT THERAPY OF EXPERIMENTAL ARTHRITIS. Irun R. Cohen, Joseph Holoshitz, Willem van Eden y Ayalla Frenkel en *Arthritis and Rheumatism*, vol. 28, n.º 8, págs. 841-845; agosto, 1985.

CLONING OF THE MYCOBACTERIAL EPITOPE RECOGNIZED BY T LYMPHOCYTES IN ADJUVANT ARTHRITIS. Willem van Eden, Jelle E. R. Thole, Ruurd van der Zee, Alie Noordzij, Jan D. A. van Embden, Evert J. Hensen e Irun R. Cohen en *Nature*, vol. 331, n.º 6152, págs. 171-173; 14 de enero de 1988.

EL PARADIGMA DE LA MEMBRANA EN LOS AGUJEROS NEGROS

THE STRUCTURE OF SCIENTIFIC REVOLUTIONS. Thomas S. Kuhn. University of Chicago Press, 1970.

BLACK HOLES: THE MEMBRANE PARADIGM. Kip S. Thorne, Richard H. Price y Douglas A. Macdonald. Yale University Press, 1986.

REACCIONES QUIMICAS Y HACES MOLECULARES

MOLECULAR REACTION DYNAMICS. R. D. Levine y R. B. Bernstein. Clarendon Press-Oxford University Press; Nueva York, 1974.

CHEMICAL DYNAMICS VIA MOLECULAR BEAMS AND LASER TECHNIQUES. R. B. Bernstein. Clarendon Press-Oxford University Press; Nueva York, 1982.

CINÉTICA Y DINÁMICA MOLECULAR DE LAS REACCIONES QUÍMICAS ELEMENTALES. A. González Ureña. Alhambra; Madrid, 1985.

INFLUENCE OF TRANSLATIONAL ENERGY UPON REACTIVE CROSS-SECTION: NEUTRAL-NEUTRAL COLLISIONS. A. González Ureña en *Adv. Chem. Phys.*, vol. 66, pág. 213; 1987.

LA LUZ, ACTIVADORA DE GENES VEGETALES

THE CONTROL OF GROWTH AND DIFFERENTIATION IN PLANTS. P. F. Wareing e I. D. J. Phillips, Pergamon Press, 1978.

GENES. Benjamin Lewin. John Wiley & Sons, Inc., 1985.

REGULATION OF GENE EXPRESSION IN HIGHER PLANTS. Cris Kuhlemeier, Pamela J. Green y Nam-Hai Chua en *Annual Review of Plant Physiology*, vol. 38, págs. 221-257; 1987.

LOS EFECTOS DEL ESPIN EN LOS GASES

LECTURES ON SPIN-POLARIZED HYDROGEN. T. J. Greytak y D. Kleppner en *New Trends in Atomic Physics: Proceedings of Les Houches Summer School*, vol. 38, dirigido por G. Grynberg y R. Stora. Elsevier Science Publishing Co., Inc., 1984.

SPIN WAVES IN SPIN-POLARIZED HYDROGEN GAS. D. M. Lee y J. H. Freed en *Physics Today*, vol. 38, n.º 1, págs. S-18; enero, 1985.

EL COMPORTAMIENTO DE LAS BALLENAS

CALF DEVELOPMENT AND MOTHER-CALF SPATIAL RELATIONSHIPS IN SOUTHERN RIGHT WHALES. Sara Taber y Peter Thomas en *Animal Behaviour*, vol. 30, 4.ª parte, págs. 1072-1083; noviembre, 1982.

COMMUNICATION AND BEHAVIOR OF WHALES (AAAS SELECTED SYMPOSIUM 76). Dirigido por Roger Payne. Westview Press, 1983.

SOURCE OF THE HUMPBACK'S SONG. Jim Darling en *Oceans*, vol. 17, n.º 2, págs. 4-10; marzo-abril, 1984.

BEHAVIOR OF BOWHEAD WHALES, *BALAENA MYSTICETUS*, SUMMERING IN THE BEAUFORT SEA: A DESCRIPTION. Bernd Würsig, Eleanor M. Dorsey, Mark A. Fraker, Roger S. Payne y W. John Richardson en *Fishery Bulletin*, vol. 83, n.º 3, págs. 357-377; julio, 1985.

POPULATION BIOLOGY, SOCIAL BEHAVIOR AND COMMUNICATION IN WHALES AND DOLPHINS. Peter Tyack en *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 1, n.º 6, págs. 144-150; diciembre, 1986.

WILD WHALES. James Darling. West Coast Whale Research Foundation, 1987.

LOS POLIPOS DE TREMBLEY

ABRAHAM TREMBLEY OF GENEVA: SCIENTIST AND PHILOSOPHER 1710-1784. John R. Baker. Edward Arnold & Co., 1952.

TISSUE GRAFTING IN ANIMALS: ITS DISCOVERY IN 1742 BY ABRAHAM TREMBLEY AS HE EXPERIMENTED WITH *HYDRA*. Howard M. Lenhoff y Sylvia G. Lenhoff en *Biological Bulletin*, vol. 166, n.º 1, págs. 1-10; febrero, 1984.

FROM TREMBLEY'S POLYPS TO NEW DIRECTIONS IN RESEARCH ON HYDRA: PROCEEDINGS OF A SYMPOSIUM HONORING ABRAHAM TREMBLEY (1710-1784). Dirigido por Howard M. Lenhoff y Pierre Tardent en *Archives des Sciences*, vol. 38, n.º 3; septiembre-diciembre, 1985.

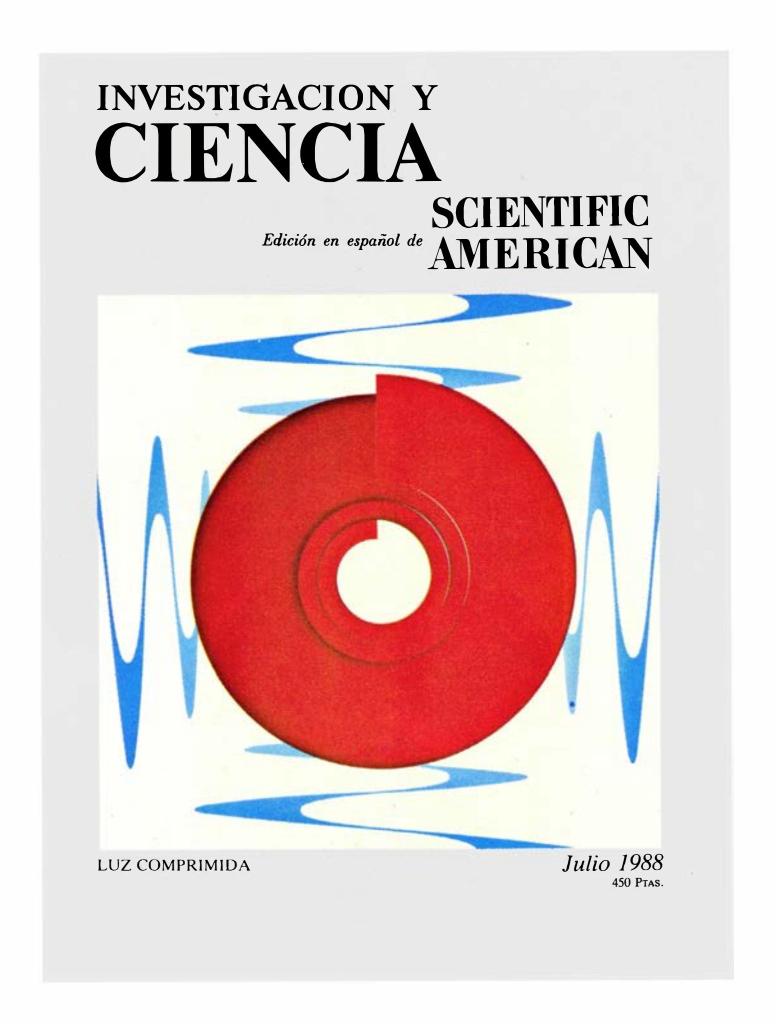
HYDRA AND THE BIRTH OF EXPERIMENTAL BIOLOGY-1744: ABRAHAM TREMBLEY'S *MÉMOIRES* CONCERNING THE POLYPS. Sylvia G. Lenhoff y Howard M. Lenhoff. The Boxwood Press, 1986.

NATURE'S ENIGMA: THE PROBLEM OF THE POLYP IN THE LETTERS OF BONNET, TREMBLEY AND RÉAMUR. Virginia P. Dawson. American Philosophical Society, 1987.

TALLER Y LABORATORIO

CONTACT ELECTRIFICATION OF INSULATORS AND ITS RELEVANCE TO ELECTRETS. D. K. Donald en *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 115, n.º 3, págs. 270-272; marzo, 1968.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LUZ COMPRIMIDA, por Richart E. Slusher y Bernard Yurke
El ruido cuántico de las ondas de luz limita la precisión de las mediciones. Una solución consiste en reducir la fluctuación de una parte de la onda incrementando el ruido en otra.

EL FACTOR DE NECROSIS TUMORAL, por Lloyd J. Old
Identificado en un principio por su actividad anticancerosa, se le considera actualmente miembro de una familia de proteínas que orquestan la compleja respuesta del organismo frente a la lesión y las infecciones.

LAS INVERSIONES MAGNETICAS, CLAVES DE LA GEODINAMO, por Kenneth A. Hoffman
¿Se encamina la Tierra hacia una inversión de su campo magnético? Aunque no puede aún responderse a esa cuestión, las rocas magnetizadas por campos magnéticos antiguos informan sobre el mecanismo de inversión del núcleo terrestre.

EL ORNITORRINCO, por Mervyn Griffiths
Este venerable mamífero de sorprendente grado de especialización posee en el pico receptores mecánicos y eléctricos para detectar las presas y regula su temperatura mejor que muchos mamíferos placentarios.

AEROGELES, por Jochen Fricke
Como revela su nombre, esos sólidos poco comunes, constituidos más por aire que por gel, son sorprendentemente ligeros y porosos. Su estructura les confiere curiosas propiedades.

INTERACCION DE LA RADIACION LASER CON LOS MATERIALES, por Carmen Ortiz
La interacción que se produce entre la radiación emitida por el láser y el material sobre el que éste actúa permite el estudio de las propiedades electrónicas, la formación de nuevos compuestos metaestables o la degradación irreversible del material.

UN OSARIO INDIO, por Francis P. McManamon y James W. Bradley
Un enterramiento colectivo de hace mil años descubierto en el Cabo Cod constituye la primera pista de una serie de pruebas según las cuales en el sur de la costa de Nueva Inglaterra se habían establecido poblaciones siglos antes de la llegada de los europeos.

EL MISTERIO DE LA CONSTANTE COSMOLOGICA, por Larry Abbott
De acuerdo con la teoría, la constante, que mide la energía del vacío, debe ser mucho mayor de lo que se cree. El esclarecimiento de esa discrepancia podría revolucionar la física fundamental.

